



**Universidade de
Aveiro 2015**

Departamento de Eletrónica,
Telecomunicações e Informática

**Gonçalo Nuno Duarte Costa Propagação de Sinais de Rádio Digitalizados sobre Fibra no
contexto de NG-PON2**



**Universidade de
Aveiro 2015**

Departamento de Eletrónica,
Telecomunicações e Informática

Gonçalo Nuno Duarte Costa

**Propagação de Sinais de Rádio Digitalizados sobre Fibra no
contexto de NG-PON2**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Dr. Mário Lima, Professor Auxiliar, e do Dr. António Teixeira, Professor Associado com Agregação, ambos do Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho aos meus pais pelo incansável apoio.

O Júri

Presidente

Prof. Dr. Paulo Miguel Nepomuceno Pereira Monteiro
Professor Associado da Universidade de Aveiro

Vogais

Prof. Doutor Mário José Neves de Lima
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (Orientador)

Prof. Doutor Paulo Sérgio de Brito André
Professor Associado com Agregação do Instituto
Superior Técnico

Agradecimentos

Serve o presente texto para agradecer a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos colegas da sala de bolsiros, em especial ao Diogo Viana e ao Nei Oliveira, obrigado pela paciência e dedicação com que deixaram o seu trabalho para me ajudar.

Aos professores Mário Lima e António Teixeira, um obrigado pela forma exemplar como me orientaram durante este percurso.

Ao João Milheiro, Hugo Lopes e João da Silva, um obrigado por tornarem todo o meu percurso académico algo memorável.

A todos os meus colegas da Comissão de Faina, um obrigado por todos os bons momentos durante o meu último ano.

À Carolina, o maior e especial agradecimento por me ter sempre apoiado e por nunca sair do meu lado durante estes 5 anos.

Aos meus pais, que sempre foram uma família exemplar e aos quais eu devo tudo.

Palavras-chave

Rádio sobre Fibra, Rádio Digitalizado sobre Fibra, NG-PON2, RF, Filtros Óticos.

Resumo

Com o crescente aumento da utilização das telecomunicações terão de surgir novas formas de assegurar a qualidade de serviço e neste contexto, surgem a transmissão de rádio sobre fibra e as redes óticas passivas de próxima geração.

A transmissão de rádio sobre fibra traz benefícios a nível da simplificação das estações base, assim como uma poupança significativa em manutenção.

As redes óticas passivas de próxima geração surgem como uma necessidade devido à crescente busca por maior largura de banda e estas vêm colmatar a futura sobrecarga a que as redes óticas atuais estarão sujeitas.

No presente trabalho estuda-se o impacto de alguns importantes parâmetros do sistema ótico na transmissão digital e analógica de rádio sobre fibra. Na transmissão analógica estudou-se o impacto dos fenómenos limitativos associados ao modulador *Mach-Zehnder* e testou-se, experimentalmente e por simulação, a influência da introdução de fibra neste mesmo sistema. Já na transmissão digital analisou-se o impacto do número de bits de resolução no desempenho do sistema, considerando cenários com e sem fibra.

Concluiu-se que a transmissão digital permite obter valores de sensibilidade mais reduzidos, à custa do aumento da resolução e consequentemente do ritmo de transmissão, logo com impacto quando se considera propagação em fibra.

Também neste trabalho realizou-se um estudo do filtro de seleção de canal, em NG-PON2. Em relação a este tópico, simulou-se um sistema onde se alterou o tipo de filtro e a ordem do mesmo e observou-se o impacto que estes teriam caso se dessintonizasse o filtro e caso se introduzisse fibra.

Keywords

Radio over Fiber, Digital Radio over Fiber, NG-PON2, RF, Optical Filters.

Abstract

With the increased use of telecommunications, new ways of ensuring the quality of service must be developed and in this perspective there are two technologies arising: radio over fiber technology and next generation passive optical networks

Radio over fiber transmission allows the simplification of the base stations, as well as provides great maintenance savings.

Next generation passive optical networks arise as a need due to the growing need for bandwidth and also to prevent the future overload that the existing networks will suffer.

In this work, the impact of some important parameters related to the transmission of radio over fiber, both digital and analogue, are studied. In the analogue transmission, it was studied the impact of the phenomena related to the Mach-Zehnder modulator and also the influence of fiber introduction in this system (simulated and tested in the laboratory). In the digital transmission, the main objects of study were the impact of the number of resolution bits in the system's performance and also how the introduction of fiber would affect the system; both topics were simulated and tested in the laboratory.

Related to radio over fiber transmissions it was concluded that the digital transmission has advantages over the analogue transmission, since it is possible to receive lower values of optical power, maintaining the same error value.

Another object of study in this work was the channel selecting filter in the NG-PON2 technology. About this topic, it was simulated a system in which the type of the filter and its order was changed and their impact on the system was simulated when it suffered from detuning and when fiber was introduced.

Conteúdo

Conteúdo	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	v
Lista de Acrónimos	vii
1. Introdução	1
1.1. Contexto e motivação	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Estrutura da Dissertação	2
1.4. Principais Contribuições	3
2. Sistemas Óticos	5
2.1. Laser	5
2.1.1. Intensidade relativa de Ruído	5
2.1.2. Largura de Linha	5
2.2. Modulação de intensidade	5
2.2.1. Modulação direta de díodos de laser	6
2.2.1.1. <i>Chirp</i>	6
2.2.1.2. Eficiência da modulação em amplitude	6
2.2.1.3. Não Linearidade: <i>Clipping</i>	7
2.2.2. Modulação externa	7
2.2.2.1. <i>Mach-Zehnder</i>	7
2.2.2.1.1. Regime linear do <i>Mach-Zehnder</i> e Eficiência	8
2.2.2.1.2. Propriedades não lineares: Multiplicação de Frequência e Produtos de intermodulação	8
2.3. Fibra Ótica	9
2.3.1. Propriedades Lineares	9
2.3.1.1. Atenuação	9
2.3.1.2. Dispersão Cromática	10
2.3.1.3. Desvanecimento de Potência	11
2.3.2. Propriedades não lineares da fibra	12
2.3.2.1. Espalhamento estimulado de <i>Raman</i>	12
2.3.2.2. Espalhamento estimulado de <i>Brillouin</i>	12
2.3.2.3. Auto modulação de fase	12
2.3.2.4. Modulação de fase cruzada	12
2.3.2.5. Mistura de quatro ondas	13
2.4. Recetores	13

2.4.1.	Díodos PIN	13
2.4.2.	Díodo de Avalanche	14
2.5.	Conclusões	14
3.	Sistemas de transmissão de Rádio em redes de acesso de próxima geração	15
3.1.	<i>Radio over Fiber (ROF)</i>	15
3.1.1.	Vantagens	16
3.1.2.	Desvantagens	17
3.1.3.	Técnicas de detecção	18
3.2.	<i>Digital Radio over Fiber (DROF)</i>	18
3.2.1.	Vantagens	19
3.2.2.	Desvantagens	19
3.2.3.	Amostragem de Banda de Passagem (<i>bandpass Sampling</i>)	20
3.2.4.	Gama dinâmica de funcionamento	21
3.2.5.	Arquitetura	21
3.3.	NG-PON2	22
3.3.1.	Requerimentos e Arquitetura de NG-PON2	22
3.3.2.	BOSA	24
3.4.	Conclusões	24
4.	Resultados de simulação e experimentais	25
4.1.	<i>Resultados de simulação de Radio Over Fiber</i>	25
4.1.1.	Caracterização do MZM	26
4.1.2.	Desempenho do sistema em <i>Back-to-Back</i>	27
4.1.3.	Caracterização do Fotodíodo	28
4.1.4.	Introdução de Fibra	29
4.2.	Resultados Laboratoriais de Rádio Sobre Fibra	29
4.3.	Resultados de simulação de <i>Digital Radio Over Fiber</i>	32
4.4.	Resultados Laboratoriais de DROF e comparação com resultados teóricos	36
4.5.	Estudo do filtro de seleção de canal em NG-PON2	39
4.5.1.	Filtro de <i>Bessel</i>	41
4.5.2.	Filtro <i>Butterworth</i>	44
4.5.3.	Filtro <i>Chebyshev</i>	47
4.5.4.	Comparação dos tipos de filtro	50
5.	Conclusões e trabalho futuro	51
5.1.	Conclusões	51
5.2.	Trabalho Futuro	52
6.	Bibliografia	53

Lista de Figuras

Figura 1: Variação da potência ótica de saída com a corrente de entrada [11].....	6
Figura 2: Efeito de Clipping no laser [13].....	7
Figura 3: Eficiência de transmissão do MZM em função da tensão aplicada. [15].....	8
Figura 4: Atenuação nas 3 janelas principais de transmissão sobre fibra. [16]	10
Figura 5: Dispersão cromática, resultante da combinação da dispersão material e dispersão do guia de onda em função do comprimento de onda [17].	11
Figura 6: Efeito do desvanecimento ao longo de uma fibra [18].	11
Figura 7: Esquema de um sistema de transmissão de rádio sobre fibra.	16
Figura 8: Espectro após amostragem de banda de passagem [21].	20
Figura 9: Esquema de uma ligação de ROF (a) e esquema de uma ligação DROF (b). [2]	21
Figura 10: Comparação entre ROF analógico e digital [26].	22
Figura 11: Diagrama do sistema TWDM-PON. [28].....	23
Figura 12: Planeamento de comprimentos de onda atual. [27]	23
Figura 13: Esquemático utilizado para simular o sistema de Rádio sobre fibra.....	26
Figura 14: Potência à saída do MZM em função do Bias (V).....	26
Figura 15: EVM em função da potência ótica recebida (dBm), para diferentes valores do Drive Amplitude.	27
Figura 16: EVM em função da potência ótica recebida (dBm), para diferentes potências de emissão do Laser.....	28
Figura 17: EVM em função da potência ótica recebida (dBm), para diferentes comprimentos de fibra.	29
Figura 18: Montagem experimental de rádio analógico sobre fibra.	30
Figura 19: EVM em função da potência ótica recebida, para 0 km de fibra.	31
Figura 20: EVM em função da potência ótica recebida, para 20km de fibra.	31
Figura 21: EVM em função da potência ótica recebida, para 40 km de fibra.	32
Figura 22: Diagrama de blocos do sistema rádio digital sobre fibra.	33
Figura 23: Sinal QAM gerado (ponto a).	33
Figura 24: Sinal após a normalização (ponto b).	33
Figura 25: Sinal após o codificador NRZ (ponto c).	33
Figura 26: Sinal antes da fibra (ponto d).	33
Figura 27: Sinal depois do recetor (ponto e).	34
Figura 28: Sinal decodificado (ponto f).	34
Figura 29: EVM em função do número de bits.	34
Figura 30: EVM em função da potência ótica recebida (dBm), com resolução de 4 bits, para 40km e 0 km.....	35
Figura 31: EVM em função da potência ótica recebida (dBm), com resolução de 8 bits, para 40km e 0 km.....	35
Figura 32: Montagem experimental de rádio digitalizado sobre fibra.	36
Figura 33: EVM em função da Potência ótica recebida (dBm), para 0 km de fibra.....	37
Figura 34: EVM em função da potência ótica recebida (dBm), para 40km de fibra.	38
Figura 35: Comparação dos resultados teóricos e experimentais, para 4 bits.....	39
Figura 36: Comparação dos resultados teóricos e experimentais, para 8 bits.....	39
Figura 37: Esquemático simulado de NG-PON2.....	40

Figura 38: BER em função do desvio da frequência, para várias ordens do filtro de Bessel.....	41
Figura 39: Magnitude do filtro (100 GHz)	42
Figura 40: Magnitude do filtro (20 GHz).....	42
Figura 41: Atraso para várias ordens do filtro de Bessel.	42
Figura 42: BER em função do comprimento de fibra (m).....	43
Figura 43: Dessintonia num filtro de Bessel, para vários comprimentos de fibra.	43
Figura 44: BER em função do desvio de frequência para várias ordens de um filtro Butterworth.	44
Figura 45: Magnitude do filtro (100 GHz)	45
Figura 46: Magnitude do filtro (20 GHz).....	45
Figura 47: Atraso para as várias ordens do filtro Butterworth.	45
Figura 48: BER em função do tamanho da fibra.	46
Figura 49: Dessintonia num filtro butterworth, para vários comprimentos de fibra.....	46
Figura 50: BER em função do desvio de frequência central, para várias ordens de um filtro de Chebyshev.	47
Figura 51: Magnitude do filtro Chebyshev (100 GHz).	47
Figura 52: Magnitude do filtro Chebyshev (20 GHz).	48
Figura 53: Atraso para as várias ordens do filtro Chebyshev.	48
Figura 54: BER em função do comprimento da fibra.....	49
Figura 55: BER em função do desvio da frequência central para vários comprimentos de fibra (num filtro Chebyshev).....	49

Lista de Tabelas

Tabela 1: Parâmetros globais do sistema.	25
Tabela 2: parâmetros dos componentes experimentais da montagem de ROF.	30
Tabela 3: Parâmetros utilizados na simulação de rádio digital sobre fibra.	32
Tabela 4: Parâmetros dos componentes experimentais da montagem de DROF.	37
Tabela 5: Parâmetros mais relevantes do esquemático de NG-PON2.	40
Tabela 6: Máximo desvio da frequência central, para vários comprimentos de fibra.	44
Tabela 7: Máximo desvio da frequência central, para vários comprimentos de fibra.	46
Tabela 8: Máximo desvio da frequência central, para vários comprimentos de fibra.	49

Lista de Acrónimos

ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
AM	<i>Amplitude Modulation</i>
APD	<i>Avalanche Photodiode</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BOSA	<i>Bi-directional Optical Sub Assembly</i>
BS	<i>Base Station</i>
CS	<i>Central Station</i>
DAC	<i>Digital-to-Analog Converter</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DCF	<i>Dispersion Compensating Fiber</i>
DFB	<i>Distributed Feedback Laser</i>
DROF	<i>Digital Radio Over Fiber</i>
EVM	<i>Error Vector Magnitude</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FM	<i>Frequency Modulation</i>
FSAN	<i>Full Service Access Network</i>
FTTH	<i>Fiber to the Home</i>
GPON	<i>Gigabit Passive Optical Network</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ITU-T	<i>International Telecommunication Union - Telecommunication</i>
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
MMF	<i>Multi Mode Fiber</i>
MZM	<i>Mach-Zehnder Modulator</i>
NG-PON2	<i>Next Generation Passive Optical Network</i>
NRZ	<i>Non Return to Zero</i>
OLT	<i>Optical Line Termination</i>
OMI	<i>Optical Modulation Index</i>
ONU	<i>Optical Network Unit</i>
PON	<i>Passive Optical Network</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
RAP	<i>Remote Access Point</i>
RAU	<i>Remote Antenna Unit</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
RIN	<i>Relative intensity noise</i>
ROF	<i>Radio Over Fiber</i>
SBS	<i>Stimulated Brillouin Scattering</i>
SER	<i>Symbol Error Rate</i>
SMF	<i>Single Mode Fiber</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SPM	<i>Self Phase Modulation</i>
TWDM	<i>Time and Wavelength Division Multiplexing</i>
VCSEL	<i>Vertical-cavity surface-emitting laser</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>
XG-PON	<i>10 Gigabit Passive Optical Network</i>

1. Introdução

1.1. Contexto e motivação

Atualmente as telecomunicações desempenham um importante papel na vida dos cidadãos. Sendo este um mercado com muita procura, é natural que a concorrência entre fornecedores deste serviço seja feroz e, por isso, a busca por novas tecnologias que venham saciar a necessidade crescente por largura de banda é incessante. As antigas tecnologias baseadas em linha de cobre já atingiram os seus limites e cada vez mais se aposta em tecnologias óticas.

Devido ao desenvolvimento crescente no domínio ótico, os operadores viram a oportunidade de fazer crescer a capacidade das suas redes de distribuição de sinal de rádio, tendo surgido soluções de transmissão de rádio sobre fibra: ROF (*Radio over Fiber*) e DROF (*Digital Radio over Fiber*).

Estas tecnologias apresentam-se como muito promissoras, uma vez que permitem simplificar as arquiteturas das estações base de antenas remotas, transferindo funções complexas para uma estação central. Uma vez que as redes em fibra ótica apresentam uma elevada capacidade de transmissão, estas permitem implementar redes de banda larga para transmissão de rádio sobre fibra entre estações base e estação central. [1]

Os sinais no domínio digital apresentam uma maior robustez contra o ruído e também um melhor desempenho. [1] Ao efetuar a digitalização de sinais de rádio frequência é possível manter a gama dinâmica independente da distância até ao ponto em que já não é possível transmitir o sinal sem erros. Desta forma, a transmissão do sinal no domínio digital permite obter uma maior gama dinâmica que pode ser mantida ao longo de maiores distâncias, comparativamente com o caso analógico. [2]

Como já foi referido, as soluções anteriores permitem uma redução da complexidade dos equipamentos utilizados, que leva a uma redução dos custos de operação. No entanto, as empresas de telecomunicações procuram cada vez mais reduzir os custos de operação e de investimento no *upgrade* das suas redes, o que conduziu ao estudo de várias tecnologias e arquiteturas, sendo que algumas normas das redes óticas passivas (PON) foram aprovadas pelo ITU-T [3] (*International Telecommunication Union – Telecommunication*) e pelo IEEE [4] (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*).

Apesar de as redes atuais já possuírem características bastante interessantes, estas deixarão de satisfazer as necessidades de largura de banda dos utilizadores. De forma a corrigir a sobrecarga que as redes de acesso estarão sujeitas, continua-se a estudar novas tecnologias, que são conhecidas como NG-PON (*Next Generation Passive Optical Networks*), que irão providenciar maior largura de banda, maior número de clientes e maior alcance, ao mesmo tempo que permitem a coexistência entre as suas precedentes, poupando assim dinheiro em substituições de material e em custos operacionais.

As redes óticas passivas de próxima geração podem-se dividir, segundo o FSAN [5] (*Full Service Access Network*), em dois tipos: NG-PON1 e NG-PON2. As primeiras são definidas como soluções a médio prazo e as segundas a longo prazo.

Sendo um dos principais elementos em NG-PON2, o filtro de seleção de canal pode introduzir sérios erros caso não sejam bem conhecidas as suas características. Desta forma é imperativo estudar o seu comportamento quando sujeito a uma série de alterações das suas características de funcionamento.

1.2. Objetivos

A presente dissertação tem como principais objetivos:

- Estudar a transmissão de sinal RF analógico e digital sobre fibra, ROF e DROF, respetivamente.
- Observar o impacto de parâmetros associados a diferentes componentes do sistema ROF, nomeadamente:
 - Ponto de funcionamento do modulador ótico (tensão de polarização e amplitude do sinal elétrico modulante),
 - Potência de emissão do Laser,
 - Comprimento total de fibra ótica.
- Observar o impacto da alteração de importantes parâmetros em sistemas DROF:
 - Número de bits de resolução,
 - Comprimento total de Fibra ótica.
- Estudo de vários parâmetros que afetam o filtro de seleção de canal em NG-PON2:
 - Tipo de filtro e ordem,
 - Resposta em amplitude e fase,
 - Desvio da frequência central.

1.3. Estrutura da Dissertação

O presente trabalho está dividido em 5 capítulos. O primeiro capítulo apresenta a motivação e os objetivos definidos para este trabalho. O segundo capítulo contém uma introdução aos componentes do sistema em estudo, assim como os principais parâmetros e fenómenos limitativos associados a cada um. O terceiro capítulo apresenta os conceitos envolvidos nas tecnologias de rádio sobre fibra estudadas (analógica e digital), assim como a arquitetura destas e principais vantagens e desvantagens. Ainda no terceiro capítulo também se apresenta uma breve descrição de NG-PON2 e de um importante componente desta tecnologia, o BOSA. No quarto capítulo apresentam-se resultados de simulação e experimentais para a transmissão de rádio digital e analógico sobre fibra, e apresentam-se resultados de simulação para o estudo do filtro de seleção de canal em NG-PON2. No último capítulo apresentam-se as conclusões deste trabalho, e possíveis desenvolvimentos futuros.

1.4. Principais Contribuições

O presente trabalho apresenta as seguintes contribuições para os temas abordados:

- Análise do desempenho de sistemas de rádio analógicos sobre fibra, por simulação e experimentalmente.
- Análise do desempenho de sistemas de rádio digitais sobre fibra, por simulação e experimentalmente.
- Análise do filtro de seleção de canal em termos de dessintonia e ordem num contexto de NG-PON2, por simulação.

2. Sistemas Óticos

Neste capítulo serão apresentados os principais componentes que constituem os sistemas óticos das redes de transmissão de dados sobre fibra, e fenómenos óticos associados, que limitam essa transmissão. Dos elementos destes sistemas podem-se destacar os lasers, moduladores, fibra, díodos PIN e amplificadores óticos.

2.1. Laser

Laser é um acrónimo em inglês para *Light Amplification by Stimulated Emission Radiation* (ou, em tradução livre, Amplificação de Luz por Emissão Estimulada de Radiação). O laser não é mais do que um oscilador com amplificação, realimentação e seletor de frequência. Um laser semiconductor é constituído por um meio ativo de átomos, moléculas e iões capazes de emitir radiação, também possui uma fonte de energia que tem o propósito de estimular os átomos do meio ativo, e uma cavidade ressonante formada por espelhos onde os fótons são refletidos. [6] Existem quatro tipos de laser com uso mais difundido: laser de *Fabry-Perot*, laser DBF, laser sintonizável e laser VCSEL.

2.1.1. Intensidade relativa de Ruído

A intensidade relativa de ruído (RIN) é definida como a flutuação da potência ótica do laser, que é a potência do ruído normalizada ao nível da potência média. Estas flutuações podem ser devidas a: variações do ganho médio do laser, da transferência do ruído gerado na fonte de luz ou simplesmente gerada por vibrações na cavidade do laser. [7] Este parâmetro apresenta valores típicos de ~ 150 dB/Hz e foi este o valor usado na simulação. [8]

2.1.2. Largura de Linha

A largura de linha (*linewidth*), tipicamente de um laser de frequência única, descreve-se como a largura do seu espectro ótico, mais rigorosamente é a largura da densidade espectral de potência do campo elétrico emitido em termos de frequência. [9] O valor usado para este parâmetro foi 100 kHz.

2.2. Modulação de intensidade

A modulação é um parâmetro importante quando se fala em transporte de informação através de um feixe de luz; podem ser usadas duas formas de modulação de intensidade: a direta e a externa. A modulação direta é o resultado da variação direta da corrente de *drive* do laser com o objetivo de variar a potência ótica à saída do laser; já no caso da modulação externa, esta tem o intuito de variar um nível de potência ótica fixa emitida pelo laser.

2.2.1. Modulação direta de díodos de laser

Neste tipo de modulação, como já foi referido, a informação é modulada diretamente sobre a corrente de controlo do laser, dando assim origem a um formato de modulação em intensidade que é relativamente simples e que não necessita de um bloco externo para modular os dados.

2.2.1.1. Chirp

Este fenómeno está relacionado diretamente com a largura de linha e quando se considera uma transmissão num sistema ótico, a largura de linha do laser depende do *chirp*. Este fenómeno define-se como uma variação indesejada da frequência de saída do laser, ao longo do tempo, que conduz a um aumento da largura de linha de cada sinal, como consequência da variação da corrente de *bias* associada à modulação direta. O *chirp* de um pulso ótico é normalmente entendido como a dependência temporal da sua frequência instantânea. Quando ocorre o fenómeno do aumento da frequência instantânea dá-se o nome de *up-chirp*, e quando ocorre o contrário apelida-se de *down-chirp*. [10]

2.2.1.2. Eficiência da modulação em amplitude

A eficiência da modulação em amplitude tem que ver com a relação entre a amplitude do sinal de saída e do sinal de entrada, sendo de extrema importância observar o declive da curva característica. Quanto maior for o declive maior é a amplitude à saída do modulador e, portanto, verificar-se-á um melhor ganho de modulação, e melhor *SNR*. Na Figura 1 observa-se como a potência ótica de saída varia com a corrente de entrada.

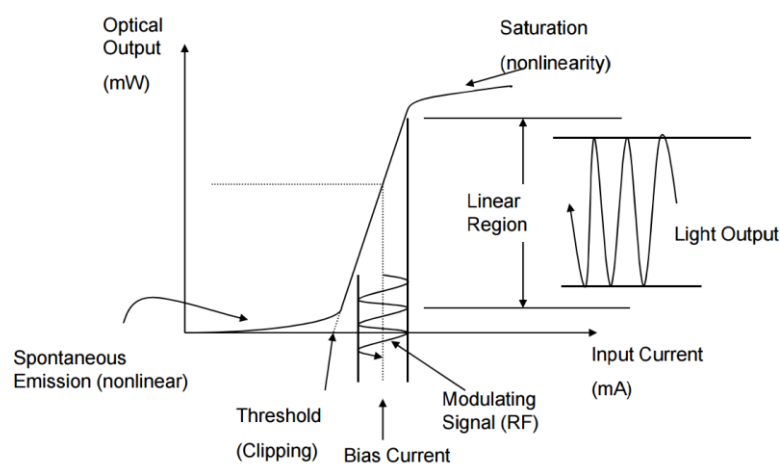


Figura 1: Variação da potência ótica de saída com a corrente de entrada [11]

A eficiência com que um laser converte a corrente em luz “utilizável” é dada pelo declive da curva L-I, da Figura 1, e isto é conhecido como ganho de modulação.

Este ganho é variável com a frequência e portanto deve ser especificado a que frequência corresponde um determinado valor de ganho. [7]

2.2.1.3. Não Linearidade: *Clipping*

O *clipping* do laser ocorre quando o índice de modulação ótico (OMI) do laser é demasiado elevado. Este índice corresponde ao rácio do pico de potência ótica em relação ao seu valor médio, e é definido no transmissor através do ajuste da amplitude do sinal RF modulante. Quando o pico da corrente de modulação excede o *threshold*, ocorre o *clipping* da saída ótica, como se verifica na Figura 2. [12]

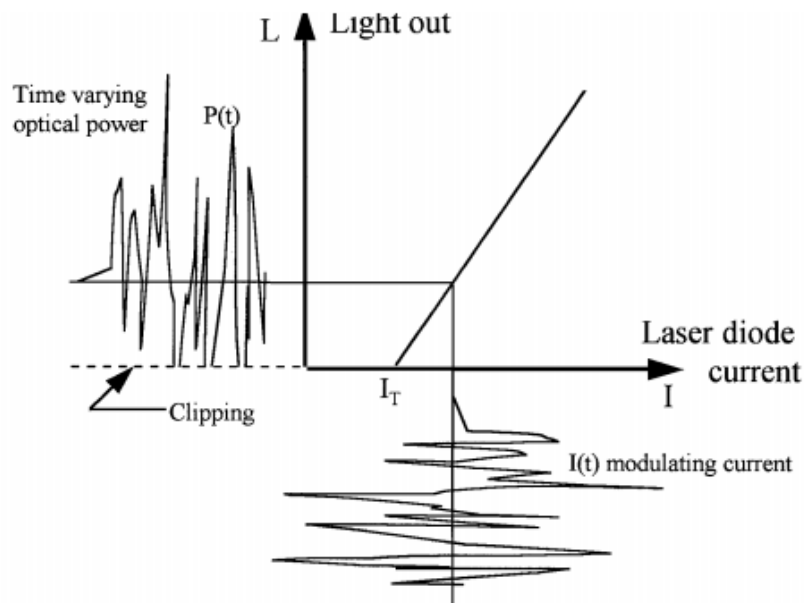


Figura 2: Efeito de Clipping no laser [13]

2.2.2. Modulação externa

A modulação externa tem o intuito de variar um nível de potência ótica fixa emitida pelo laser e nesta secção ir-se-á apresentar o modulador externo *Mach-Zehnder*.

2.2.2.1. *Mach-Zehnder*

Este modulador externo é baseado no efeito do interferómetro *Mach-Zehnder*, e utiliza o princípio de interferência construtiva e destrutiva entre a fase dos sinais que se irão propagar em cada um dos braços do modulador (formados por guias de onda). Este tipo de modulador pode fazer modulação em intensidade recorrendo ao uso de um material eletro-ótico e ao efeito do interferómetro. Caso seja aplicada uma tensão

externa, os índices de refração dos materiais eletro-óticos podem ser alterados; se não se verificar a existência de uma tensão externa, os campos óticos nos dois braços do interferómetro irão sofrer deslocamentos de fase semelhantes e irão interferir construtivamente. O desfasamento de fase adicionalmente introduzido num dos braços, devido a mudanças no índice de refração induzidas por tensão irá reduzir a natureza construtiva da interferência e reduzir a potência do sinal transmitido. Quando existe um desfasamento de valor π entre os dois braços, não será transmitido qualquer sinal porque ocorre uma interferência destrutiva completa. [14]

2.2.2.1.1. Regime linear do *Mach-Zehnder* e Eficiência

O modulador *Mach-Zehnder* é um bloco básico usado no desenho de sistemas óticos de telecomunicações analógicas de modulação em amplitude e a característica destes dispositivos tem a forma de um cosseno. De modo a que o dispositivo tenha um comportamento linear e com um mínimo de distorção, deve-se polarizar na zona mais linear da curva característica.

Na Figura 3 pode-se verificar que o declive do ponto A para o ponto C tem uma influência direta com a amplitude do sinal de saída. Quanto maior for o declive, maior poderá ser a amplitude do sinal de saída, tendo em conta o ponto onde se aplica o sinal de entrada, e portanto maior será a eficiência.

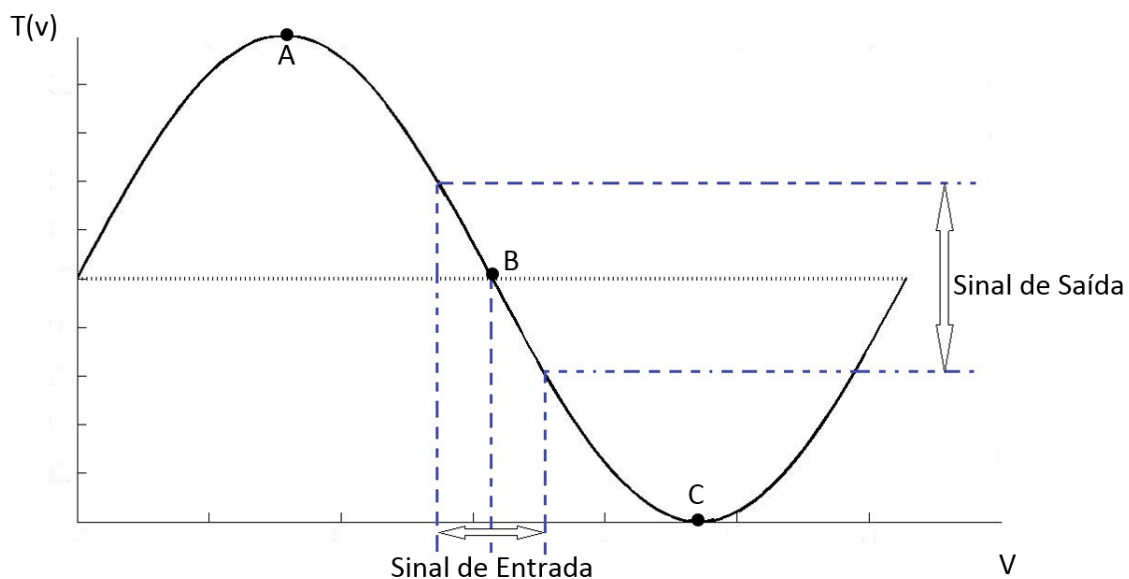


Figura 3: Eficiência de transmissão do MZM em função da tensão aplicada. [15]

2.2.2.1.2. Propriedades não lineares: Multiplicação de Frequência e Produtos de intermodulação

A multiplicação de frequências é um regime não-linear que está associado ao uso do modulador *Mach-Zehnder*. Ao aplicar uma tensão elétrica na entrada de modulação ir-se-á provocar modulação não linear do sinal ótico de entrada, com um ou mais múltiplos integrais do sinal elétrico de entrada. Este sinal de entrada é

adicionalmente aplicado à entrada de modulação indo, portanto, causar multiplicação de frequência. [15] Um exemplo é caso se pretenda obter o dobro da frequência usando um MZM, sendo este polarizado na zona onde a transferência de potência será máxima.

Outra característica não linear associada a este tipo de dispositivos é a intermodulação. Esta consiste numa modulação do sinal com frequências indesejadas. A intermodulação entre cada componente da frequência irá formar sinais adicionais a frequências que não são normalmente frequências harmônicas do sinal de entrada, sendo muito regularmente somas ou diferenças de frequência da frequência original. O sinal de saída pode ser então estimado recorrendo a séries de *Taylor*. [15]

2.3. Fibra Ótica

A fibra ótica é um componente de essência fulcral nas redes óticas, uma vez que funciona como meio de propagação do sinal ótico emitido. Durante a propagação neste meio, o sinal vai sofrer vários fenómenos lineares, não lineares ou uma combinação de ambos, e que irão afetar a performance do sistema. Estes fenómenos irão causar limitações na distância de transmissão e na taxa de transmissão, pelo que serão alvo de análise neste capítulo.

Dependendo do número de modos, as fibras poderão ser classificadas em dois grupos: monomodo e multimodo. As fibras de modo único são usadas quando se pretende propagar apenas um modo, possuindo um núcleo de menor diâmetro em comparação com as fibras multimodo. As segundas têm um maior número de modos que podem propagar, devido ao aumento do diâmetro do seu núcleo e da abertura numérica. Em termos de distância de propagação, as de modo único são usadas para elevadas distâncias enquanto as outras são utilizadas em ligações de menor distância. [12]

2.3.1. Propriedades Lineares

Nas ligações de fibra ótica estão sempre presentes duas propriedades lineares: a atenuação e a dispersão. Estas duas propriedades irão ter influência na distância e ritmo de transmissão máximos de propagação do sinal.

2.3.1.1. Atenuação

A atenuação é a forma de quantificar a quantidade de sinal ótico que é perdido durante a transmissão do sinal e esta varia de forma exponencial dependendo da distância de propagação, como se verifica na equação seguinte [15]:

$$P(x) = P_0 e^{-\alpha_p x}$$

Na equação anterior, α_p é o coeficiente de atenuação na fibra expresso em km^{-1} e P_0 é a potência do sinal, quando se inicia a propagação e x é a distância que é percorrida. Usualmente, utiliza-se a equação seguinte para exprimir a atenuação em dB/km [15]:

$$\alpha_{dB/km} = \frac{10}{L} \cdot \log\left(\frac{P_{in}}{P_{out}}\right)$$

Na Figura 4 apresenta-se a variação do coeficiente de atenuação em função do comprimento de onda. Existem 3 regiões onde a atenuação é reduzida, que foram sendo utilizadas nos diferentes sistemas de comunicações óticas ao longo do tempo, sendo que atualmente se opera na janela dos 1550 nm (3ª janela), correspondendo a uma atenuação de aproximadamente 0.2 dB/km.

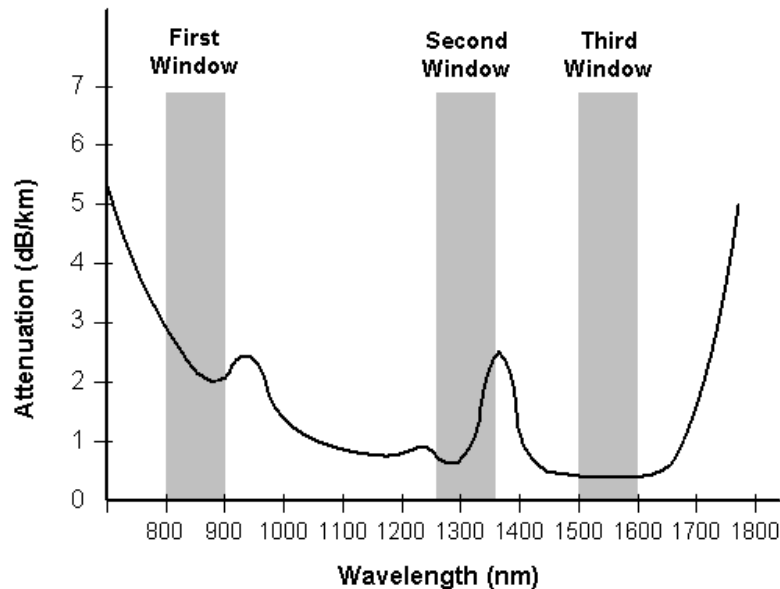


Figura 4: Atenuação nas 3 janelas principais de transmissão sobre fibra. [16]

2.3.1.2. Dispersão Cromática

A dispersão cromática define-se como um alargamento temporal do impulso ótico transmitido, que ocorre num único modo. Esta é resultante do facto da velocidade de grupo ser função do comprimento de onda, o que resulta em diferentes componentes espectrais a viajarem a diferentes velocidades dentro da fibra.

A dispersão cromática divide-se em duas componentes: a dispersão no material e a dispersão no guia de onda. A dispersão no material ocorre devido às variações, com a frequência, do índice de refração da sílica, provocando uma dependência direta da velocidade de grupo com o comprimento de onda. Já no caso da dispersão no guia de onda, este tem a ver com a forma como a energia está distribuída entre o núcleo da fibra e a bainha, que é também dependente do comprimento de onda. [12]

As duas componentes descritas anteriormente dão origem à dispersão cromática como se ilustra na Figura 5.

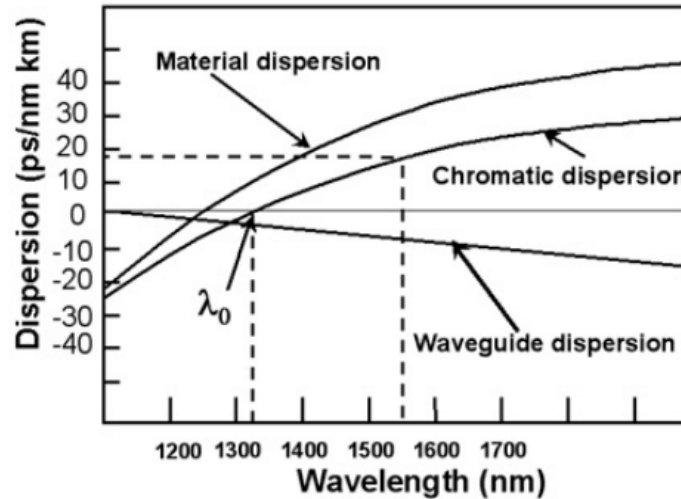


Figura 5: Dispersão cromática, resultante da combinação da dispersão material e dispersão do guia de onda em função do comprimento de onda [17].

2.3.1.3. Desvanecimento de Potência

Um dos maiores impactos na transmissão sobre fibra ótica é a degradação pela dispersão cromática, que no caso de se ter um sinal RF sobre uma portadora ótica se traduzirá num desvanecimento (periódico) da potência do sinal ao longo da propagação na fibra. [18] Na Figura 6 pode-se observar uma análise numérica do comportamento da potência do sinal RF em função do comprimento de fibra, para diferentes frequências da portadora:

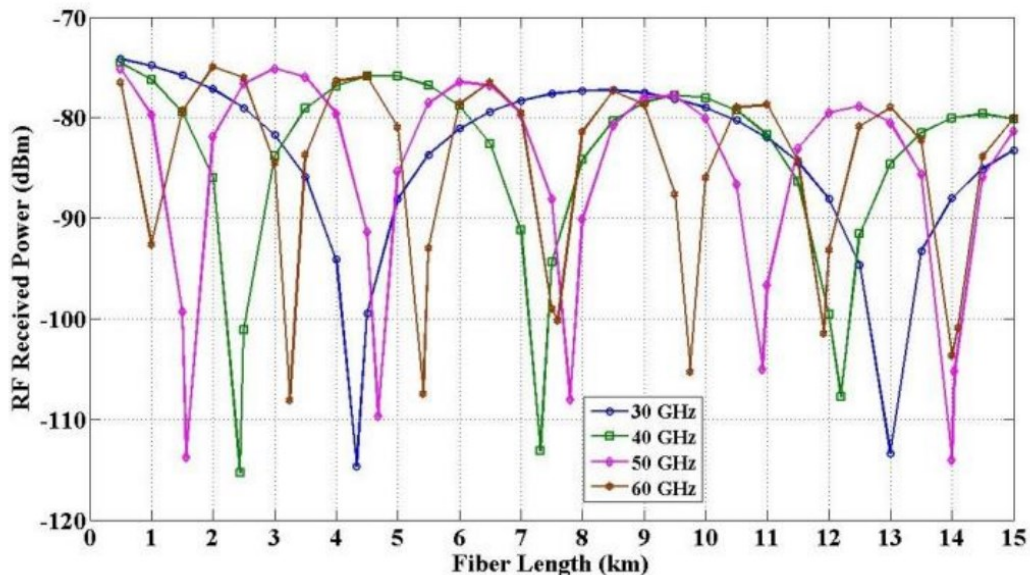


Figura 6: Efeito do desvanecimento ao longo de uma fibra [18].

Como é possível observar, cada frequência RF apresenta nulos na potência recebida, em diferentes valores do comprimento da fibra.

2.3.2. Propriedades não lineares da fibra

Adicionalmente à atenuação e dispersão, as fibras também introduzem efeitos não lineares que ocorrem devido à resposta não linear do meio perante sinais óticos de elevada intensidade. As propriedades não lineares da fibra têm uma história relativamente recente, uma vez que começaram a ser investigadas nos anos 60. Entre as mais interessantes de estudar estão: espalhamento estimulado de *Raman*, o espalhamento estimulado de *Brillouin*, a auto-modulação de fase, a modulação de fase cruzada e a mistura de quatro ondas. A seguir ir-se-á explicar em que consiste cada um destes fenómenos, ainda que de forma sucinta, uma vez que os efeitos não lineares não têm um impacto significativo nos testes apresentados mais adiante.

2.3.2.1. Espalhamento estimulado de *Raman*

O espalhamento estimulado de *Raman* (SRS – *Stimulated Raman Scattering*) é de particular interesse, já que pode transformar as fibras óticas em amplificadores. Este é um efeito limitador nos sistemas multicanal, uma vez que causa a transferência de potência de uns canais para os outros. Este espalhamento é causado pela interação entre o sinal propagado e as propriedades intrínsecas da fibra; quando um fóton incidente perde a sua energia, surge outro fóton com energia inferior e assim sucessivamente, sendo que o sinal propagante atua como uma fonte de fótons que permite a geração destes com energia inferior e que estão deslocados em frequência do sinal original, criando assim o espalhamento estimulado de *Raman*. [19]

2.3.2.2. Espalhamento estimulado de *Brillouin*

O espalhamento estimulado de *Brillouin* (SBS – *Stimulated Brillouin Scattering*) coloca uma limitação ao limite superior da potência ótica máxima que pode ser lançada eficientemente na fibra. Quando o limite, que é dependente da largura de linha da fonte ótica, é ultrapassado uma significativa parte da luz transmitida é redirecionada para o transmissor, causando assim reflexões no sinal ótico transmitido, degradando a BER (*Bit Error Rate*).

2.3.2.3. Auto modulação de fase

A auto modulação de fase (SPM – *Self Phase Modulation*) é devida à dependência do índice de refração do núcleo da fibra com a potência, levando ao alargamento espectral do sinal.

2.3.2.4. Modulação de fase cruzada

Os fenómenos de modulação de fase cruzada é semelhante ao de auto modulação de fase, mas em que a modulação de fase é provocada pelos sinais

presentes nos outros canais (com outros comprimentos de onda). O seu impacto depende do espaçamento entre os canais.

2.3.2.5. Mistura de quatro ondas

A mistura de quatro ondas ocorre quando a luz de dois ou mais comprimentos de onda é lançada numa fibra e interagem entre si na sequência do batimento de frequências três a três (por exemplo), originando novas frequências.

2.4. Recetores

Neste capítulo ir-se-ão apresentar os recetores *PIN* e *APD*, sendo apresentadas algumas características dos mesmos e as diferenças principais entre ambos.

2.4.1. Díodos PIN

O fotodíodo do tipo PIN é um tipo de fotodetetor que converte sinais óticos em sinais elétricos. Esta tecnologia foi inventada nos anos 50 e desde então tem obtido uma relevância bastante elevada. [20]

Neste tipo de díodos é introduzida uma ligeira camada intrínseca entre as regiões p e n do semiconductor; a camada intrínseca é bombardeada com portadores de cargas das regiões p e n até que se atinge um equilíbrio (número de lacunas é igual ao número de eletrões), começando então a conduzir corrente. Ao comparar a largura da região p e n com a largura da região intrínseca verifica-se que as regiões p e n são muito mais pequenas quando comparadas com a largura da região intrínseca e portanto tem-se que grande parte da absorção da luz se processa nesta região e isto vem aumentar a eficiência e responsividade do fotodíodo. Adicionalmente, ao polarizar inversamente a região intrínseca, verifica-se uma redução da região de depleção e uma redução da capacidade da junção, o que irá fornecer um aumento na largura de banda. A presença da região intrínseca também aumenta a sensibilidade para a luz e fornece uma região de elevado campo elétrico. Assim, o principal objetivo destes dispositivos é a deteção de sinais óticos, mantendo uma boa relação sinal-ruído. [15]

As principais fontes de ruído num fotodíodo são o ruído quântico, o ruído térmico e o ruído devido à corrente escura. O ruído quântico é uma consequência da característica aleatória do processo de foto-deteção, o segundo (ruído térmico) tem como origem a variação da temperatura e o ruído devido à corrente escura ocorre mesmo na ausência de luz devido a fugas de corrente e devido à excitação térmica dos portadores.

A característica de maior relevo para o trabalho apresentado neste documento é a sensibilidade, que consiste na potência ótica recebida necessária para se obter um determinado desempenho mínimo do sistema.

2.4.2. Díodo de Avalanche

O díodo de avalanche (APD) é um dispositivo semicondutor que quando polarizado ao contrário (*reverse-biased*), cria fortes campos elétricos na região da junção. Quando um fóton provoca um par elétron-lacuna, este par atravessa a junção. Devido ao forte campo elétrico presente na junção, o elétron ganha energia suficiente para provocar pares elétrons-lacunas secundários, que por sua vez irão gerar outros. E assim ir-se-á provocar um processo de multiplicação sucessivo (avalanche) e será gerada uma corrente substancial devido aos fótons iniciais. Consequentemente, a corrente total produzida é maior que a primeira foto-corrente gerada, sendo este processo de amplificação de corrente ocorrido dentro do fotodíodo. [15]

2.5. Conclusões

A importância deste capítulo prende-se com a apresentação dos vários componentes que constituem um sistema ótico, assim como identificar problemas na transmissão de informação, especialmente em sistemas de *Radio over Fiber*. É de extrema importância a apresentação dos fenómenos aqui discutidos, de modo a entender os resultados experimentais que mais para a frente serão discutidos. Começou-se por apresentar os lasers, de seguida passou-se aos moduladores, depois a fibra e por fim os recetores.

3. Sistemas de transmissão de Rádio em redes de acesso de próxima geração

Atualmente verifica-se a existência de uma grande panóplia de ofertas relacionadas com a transmissão de dados móveis e, por isso, tem-se constatado que existe um rápido aumento da popularidade dos sistemas de rádio e por este motivo os operadores são forçados a aumentar a sua capacidade de oferta de serviços fiáveis e rápidos, à custa do aumento da capacidade das redes já existentes. Neste sentido surgiu uma tecnologia que promete trazer benefícios em termos de custo de instalação e manutenção para as operadoras: transmissão de sinais rádio através de fibra. Com esta solução pode-se simplificar as unidades de rádio e transferir todo o equipamento de processamento para um *central office*, tornando o sistema muito mais simples.

De seguida apresentam-se os dois tipos de transmissão de rádio sobre fibra (digital e analógico), as suas vantagens e desvantagens, a arquitetura de ambos e ainda uma comparação entre eles. Também é apresentada a tecnologia NG-PON2 e um dos seus componentes, o BOSA.

3.1. *Radio over Fiber (ROF)*

Radio over Fiber é uma tecnologia que permite a transmissão de sinais de rádio através de fibra ótica. Esta tecnologia assenta no conceito que uma antena recebe múltiplos sinais de rádio e seguidamente esses sinais serão transmitidos para um ponto central (*Central Station* - CS) onde serão processados. Esta centralização do dispendioso equipamento de processamento de sinal e de rádio e também a simplificação das antenas remotas (*Remote Antenna Units* – RAU's) converte-se em poupanças significativas para os operadores de telecomunicações. Desta forma é possível poupar recursos e distribuir os sinais, através de fibra ótica, com perdas de 0.5 dB/km para 1310 nm e 0.2 dB/km para 1550 nm. Pode-se observar na Figura 7, um esquema relativamente simplificado de um sistema de *Radio over Fiber*.

Com o uso desta tecnologia as RAUs/RAPs (*Radio Access Point*) apenas precisam de realizar conversão dos sinais óticos para elétricos e amplificá-los, tornando-se extremamente mais simples. Com a centralização dos equipamentos, nas *Control Stations*, garante-se a partilha do equipamento, uma alocação dinâmica dos equipamentos, manutenção e operação mais baratas; todos os pontos anteriores traduzem-se em enormes poupanças em instalações, especialmente em locais onde a densidade de células é superior. [21]

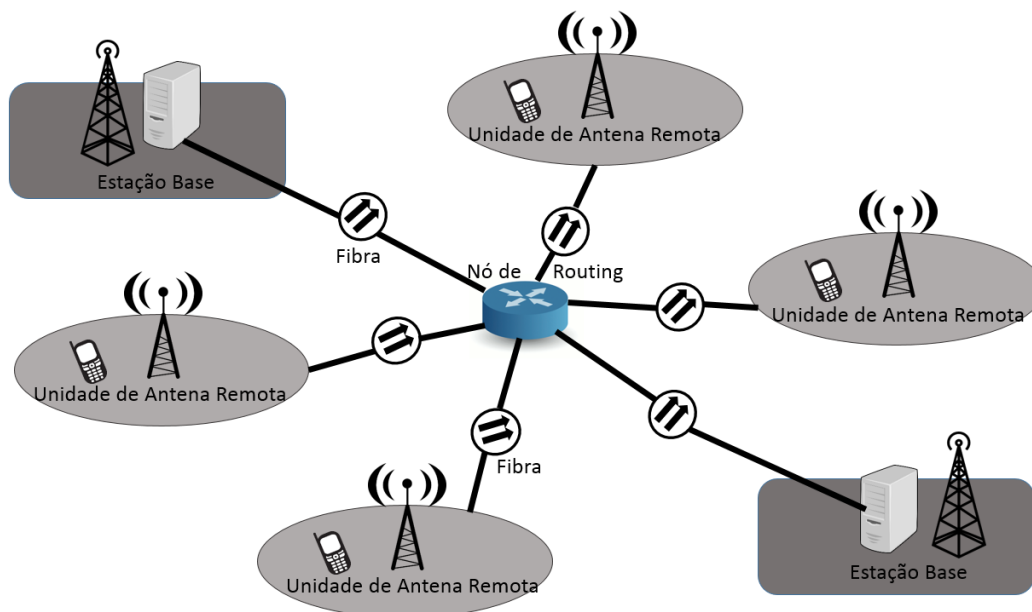


Figura 7: Esquema de um sistema de transmissão de rádio sobre fibra.

3.1.1. Vantagens

Quando se fala de vantagens inerentes à transmissão de rádio sobre fibra surge, logo à partida, o facto de a transmissão de sinal através de fibra sofrer muito baixa atenuação quando comparado com a transmissão através de outro qualquer meio. A distribuição de ondas elétricas em espaço livre ou através do uso de cabos acarreta alguns problemas e é bastante dispendiosa, pelo que o uso de fibra vem solucionar esta questão uma vez que esta oferece muito baixa atenuação e também permite a transmissão a elevadas frequências, não necessitando de conversores *up/down*, para alterar a frequência antes da transmissão. [22]

Com base no anterior, surge uma nova vantagem que é a simplificação das RAU's. O facto de não necessitar de conversão *up/down* na frequência permite que não sejam necessários osciladores locais. Outro pormenor interessante em relação à simplificação das RAU's é que com o uso desta tecnologia uma *base-station* apenas necessita de um conversor ótico-elétrico, amplificadores de Rádio Frequência e antenas, todo o restante equipamento poderá ser centralizado e utilizado por várias RAU's. [23]

A elevada largura de banda é também um ponto positivo nos sistemas de rádio sobre fibra. Existem três janelas de transmissão que oferecem baixa atenuação, nomeadamente 850 nm, 1310 nm e 1550 nm, e quando se usam estas três janelas com uma fibra SMF (*Single Mode Fiber*), a largura de banda combinada das três excede os 50 THz. No entanto, apenas se usa uma fração desta largura de banda, devido às limitações impostas pelos equipamentos elétricos existentes. [22]

Também se destaca a imunidade à interferência de rádio frequência como uma propriedade muito interessante destes sistemas. Uma vez que os dados são transmitidos sobre a forma de luz através da fibra, este tipo de transmissão é imune à

interferência rádio e por esse mesmo motivo é também conferida segurança e privacidade à transmissão ótica.

Como já referido anteriormente, o ROF permite a transferência de todo o equipamento complexo e dispendioso (osciladores locais e equipamentos relacionados) para um *central-office* onde será feito todo o processamento do sinal. Este *central-office* será partilhado por várias RAU's, tornando-as mais simples e menos dispendiosas. Obviamente que o anterior conduz a uma mais fácil e barata instalação e manutenção.

Uma vez que as RAU's são simplificadas em número de equipamentos, o seu consumo energético também será menor. Esta vantagem é importante, uma vez que existem antenas localizadas em locais remotos, por vezes sem energia proveniente da rede elétrica e nestes casos a eficiência energética torna-se fulcral.

3.1.2. Desvantagens

Apesar de todas as vantagens que foram enumeradas no ponto anterior, esta tecnologia também tem algumas desvantagens inerentes.

As ligações óticas analógicas que usem técnicas de rádio sobre fibra sofrerão dos efeitos acumulados do ruído e distorções induzidas pela não linearidade da fibra ótica e dos componentes da ligação ótica. Estes efeitos não lineares serão ainda mais pronunciados quando estes sistemas são sujeitos a elevados *bitrate*, elevadas potências de transmissão ou o uso de *WDM*. [21]

Analisando então toda a ligação, poder-se-á começar pelo laser; este elemento possui uma maior largura de banda e menor largura de linha, quando comparado com o LED. A importância da largura de linha é de extrema importância para minimizar o impacto da dispersão cromática, e esta terá que ser o mais baixa possível, pelo que os lasers deverão ser usados em detrimento dos LEDs. Esta dispersão cromática aumenta à medida que se aumenta a frequência do sinal *RF*; este aumento de dispersão cromática irá contribuir para um substancial decréscimo na performance dos sistemas de distribuição. Outro fator a ter em consideração é o *chirp* associado, caso se use modulação direta, uma vez que este alarga o espectro do sinal propagante devido à dependência da frequência de operação com as variações da corrente de *bias*. Um outro parâmetro a ter em conta, aquando da escolha do laser, é a intensidade relativa de ruído que é responsável pela degradação do sinal propagante, limitando a sua relação sinal ruído (SNR). Poderão ainda surgir fenómenos de *clipping* caso o laser não esteja corretamente polarizado ou, ainda, caso o sinal de RF tenha uma amplitude demasiado elevada. Os fenómenos de *chirp* e *clipping* poderão ser minimizados ou eliminados recorrendo ao uso de um modulador externo (como por exemplo, um modulador *Mach-Zehnder*).

O uso de moduladores *Mach-Zehnder* irá introduzir não-linearidades, nomeadamente a intermodulação, que conduzirá à degradação da relação sinal-ruído. A forma de minimizar este efeito será levar o modulador a funcionar na região linear de funcionamento.

Os sistemas de ROF utilizam um método de transporte de sinal que é analógico e que sofre, inerentemente, de distorção causada por intermodulação que, por sua vez, é devida à não-linearidade dos componentes óticos e de micro-ondas do sistema; em conjunto, estes fatores irão provocar um limite ao desempenho do sistema. [1] O efeito

de dispersão ir-se-á pronunciar de forma ainda mais acentuada à medida que se aumenta a frequência do sinal RF a transmitir na fibra e este será ainda mais um fator de encurtamento da distância de propagação, como já foi referido anteriormente.

Com a intenção de aumentar o alcance do sinal na fibra utilizam-se, muitas vezes, amplificadores óticos e quando se escolhe este tipo de equipamentos deve-se ter em conta a figura de ruído associada. Um outro aspeto que se deve ter em atenção é impedir a sua saturação, para que estes não introduzam ainda mais fenómenos não lineares no sistema.

No final da cadeia deste sistema encontra-se a receção, que será feita com foto díodos PIN. O uso destes componentes implica a introdução de ruído no sistema, piorando a relação sinal-ruído no recetor.

3.1.3. Técnicas de deteção

Nos sistemas de ROF existentes encontram-se dois tipos de técnicas de deteção: deteção direta e deteção coerente.

A maioria das *Base-Station*s de hoje utiliza a técnica de deteção direta, pelo facto de as manter relativamente simples. Nesta técnica o campo elétrico da luz incidente no recetor é diretamente convertido numa corrente elétrica usando o fotodíodo PIN. Esta opção torna-se, portanto, a opção mais simples, contudo a relação sinal-ruído degrada-se de uma forma mais intensa quando comparada com o esquema de deteção coerente. No entanto o sinal elétrico, resultante do processo de foto deteção, dependerá apenas do sinal ótico recebido, não sendo muito afetado pelo ruído de fase que afeta os sistemas de deteção coerente. [21]

Na deteção coerente, o sinal ótico e um sinal proveniente de um laser local são adicionados antes da deteção no fotodíodo. Esta solução permite obter uma melhor relação sinal-ruído, no entanto isso deve-se a um aumento da complexidade. Esta solução apresenta-se como a mais dispendiosa devido à sua complexidade e sensibilidade ao ruído de fase; devido ao seu custo não é muito utilizada nos dias de hoje. [24]

3.2. *Digital Radio over Fiber (DROF)*

As redes sem fios baseadas em transmissão de sinais rádio sobre fibra é uma tecnologia promissora e que vem responder à crescente procura por larguras de banda cada vez maiores. Esta abordagem apresenta o problema de necessitar de ligações de fibra muito lineares, de modo a conseguirem ter ganho suficiente para fazer o transporte do sinal até à antena. Outra problemática é a distorção intermodulação, sofrida pela fibra, derivada de não linearidades dos componentes de rádio e óticos. [1] Deste modo é necessário recorrer a técnicas especiais de linearização da função transferência dos componentes utilizados na ligação e este processo leva à introdução de maior complexidade e ruído.

Na tentativa de aumentar a capacidade dos sistemas de comunicação sem fios foram reduzidas as dimensões das células, assim como se diminui a potência radiada

por elas; no entanto, para que possam cobrir grandes áreas, serão necessárias muitas RAUs. [25]

É neste ponto que a digitalização do sinal traz vantagens face à transmissão do sinal analógico. Uma vez que o sinal RF que será transportado na fibra se encontra previamente digitalizado então poder-se-ão retirar vantagens em termos dos benefícios do elevado desempenho dos sistemas digitais.

3.2.1. Vantagens

Depois do processo de digitalização do sinal RF, é gerado um sinal digital que tem agora muito mais vantagens em termos de transmissão numa ligação ótica. Este tipo de sinal pode ser usado diretamente para modular um laser, sendo transmitido sobre uma fibra ótica e detetado como qualquer outra informação digital. Fazendo o anterior, será conseguida uma maior simplificação das BS (recorrendo à modulação em intensidade e deteção direta), uma vez que apenas será necessário um mínimo de *hardware* de *front-end*. [1] Outra vantagem que advém da digitalização é a maior imunidade ao ruído: caso seja transmitido um “1” ruidoso, ele é recebido como “1” e o mesmo conceito se aplica para o símbolo “0”.

Uma outra vantagem são os recentes avanços nos conversores analógico-digital (ADC) e nos conversores digital-analógico (DAC), que tornaram possível a transferência destes desde o *central office* até às estações base. Em adição, esta deslocação também irá trazer alguma simplificação das BS, uma vez que algumas funcionalidades serão realizadas no domínio digital. [21]

3.2.2. Desvantagens

A nível dos pontos menos vantajosos deste sistema deve-se começar pelos seus elementos mais importantes: as ADC's e DAC's. Estes elementos requerem uma taxa de amostragem extremamente alta de, pelo menos, duas vezes a frequência da portadora (cumprindo o Teorema de amostragem de *Nyquist*) e deste modo consegue-se uma reconstrução exata do sinal. De modo a cumprir o anterior, estes elementos irão apresentar um custo muito elevado e também introduzir alguma instabilidade no sistema. [1] De modo a solucionar esta problemática é necessário introduzir, adicionalmente, componentes de RF (como misturadores e osciladores locais) na estação base (BS). Para além do exposto, também é importante ter em conta que na maioria dos serviços sem fios apenas é usada uma pequena fração da largura de banda para transportar a informação. Consequentemente, será necessário usar a técnica de amostragem da banda de passagem, que permite usar frequências mais baixas, dependendo da largura de banda da mensagem que se pretende transmitir, em detrimento das frequências requeridas pelo Teorema de *Nyquist*. Esta técnica traz novas vantagens como a simplificação das BS's, através da eliminação dos componentes necessários para conversão de frequências. [21]

Seguidamente é importante realçar o ruído que está associado a esta tecnologia, que se deve sobretudo às transmissões analógicas. No transmissor e recetor, a maioria do ruído é devido aos conversores analógico-digital e digital-analógico; este ruído é dividido em ruído de *jitter* e ruído de quantização. O ruído de *jitter* é devido ao *jitter*

presente no relógio de amostragem e quanto maior for a frequência de relógio de uma DAC/ADC, maior é o ruído de *jitter*. No entanto nas DACs, este é devido ao processo *zero order hold*, que é utilizado para contornar o problema da geração de um trem de impulsos. Em relação ao ruído de quantização, a proveniência deste são as não-linearidades dos sinais analógicos presentes à entrada da ADC e que se manifestam numa larga banda na saída da ADC. Este tipo de ruído surge do erro de arredondamento entre a tensão analógica de entrada na ADC e o valor digital presente na saída desta, e irá provocar uma limitação na gama dinâmica da ADC. Segundo [21], o incremento da resolução da ADC irá provocar um decrescimento exponencial do erro de quantização, sendo que para resoluções abaixo de 8 bits, este é o ruído predominante no sistema DROF, enquanto para resoluções acima deste valor serão predominantes o *jitter* e o ruído no díodo recetor.

3.2.3. Amostragem de Banda de Passagem (*bandpass Sampling*)

A teoria da amostragem de banda de passagem oferece uma solução atrativa para reduzir a taxa de amostragem num processo de digitalização de um sinal. Esta é uma forma especial de subamostragem que transforma um sinal que tem uma banda de passagem a alta frequência num sinal que tem a sua banda de passagem a baixas frequências, nas proximidades de zero. A teoria clássica diz que para uma amostragem uniforme, o sinal pode ser reconstruído se a taxa de amostragem for de, pelo menos, o dobro da largura de banda da informação. Os sinais reais têm uma transformada de *Fourier* que é simétrica à volta da frequência zero e isso é um indicador de que os sinais possuem um espectro negativo da frequência que é uma cópia espelhada do que está na parte positiva da frequência. Esta teoria permite efetivamente deslocar ambos os lados do espectro através de múltiplas réplicas da frequência de amostragem. Pode-se observar este efeito na seguinte figura:

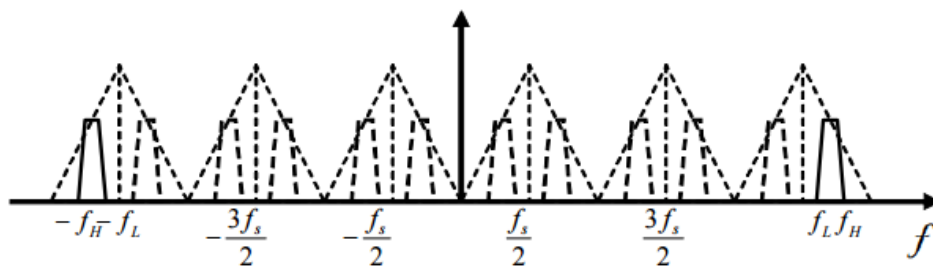


Figura 8: Espectro após amostragem de banda de passagem [21].

Observando a Figura 8, pode-se concluir que as réplicas do sinal amostrado se repetem em múltiplos inteiros de metade de frequência de amostragem e ocupam todo o espectro. No sentido de recuperar a réplica, basta utilizar um filtro passa banda centrado à frequência central da réplica. Esta frequência central da réplica é muito mais baixa que a frequência original e portanto pode-se concluir que é possível utilizar frequências de amostragem mais baixas, sendo efetuada *down-conversion* sem recorrer a osciladores locais nem misturadores.

3.2.4. Gama dinâmica de funcionamento

A performance de um sistema de comunicações sem fios é avaliada através da gama dinâmica de funcionamento de todo o sistema e define-se como o leque de níveis do sinal de entrada para os quais o sistema é funcional. [21]

Num sistema de transmissão analógico, as principais limitações à gama dinâmica de funcionamento são as perdas na ligação e o ruído associado, uma vez que cada elemento destes sistemas adiciona perdas e ruído à ligação. No DROF o sinal é imune à degradação causada pelos processos de transporte e de ruído que afetam o sistema analógico.

Ao contrário do que se verifica nos sistemas de transmissão analógica, as perdas e ruído não afetam, de forma significativa, os sistemas de transporte de sinal *RF* digital devido à natureza discreta do sinal transmitido. Neste tipo de sistemas um “1” ruidoso continua a ser um “1” e o mesmo se aplica ao “0”, a menos que a potência do ruído seja comparada com a potência do sinal e leve à perda de sincronização na ligação. Num sistema de transmissão digital de *RF* sobre fibra, desde que o sinal seja detetado este será transportado com êxito e portanto, a gama dinâmica de um sistema *DROF* manter-se-á constante até que o sinal ultrapasse a sensibilidade do recetor.

3.2.5. Arquitetura

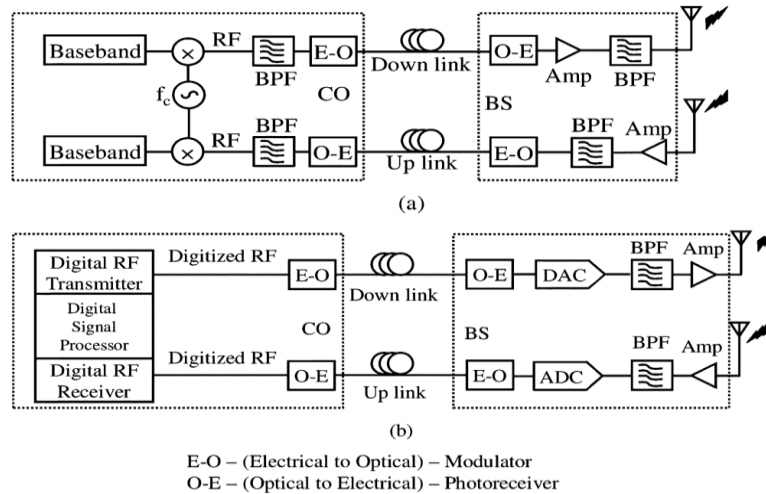


Figura 9: Esquema de uma ligação de ROF (a) e esquema de uma ligação DROF (b). [2]

A Figura 9 (a) mostra uma típica ligação analógica de rádio sobre fibra que é a base para o *Radio over Fiber*. Na figura é possível observar que existe modulação direta do sinal, através de microondas e desta forma é possível manter alguma simplicidade nas BSs (sendo apenas necessário realizar filtragem e amplificação). Caso seja necessário transmitir a frequências superiores terão de se usar moduladores externos e isso conduz a um aumento da distorção, já que as ligações óticas usadas para transmissão de sinais rádio sobre fibra sofrem de distorções por intermodulação, devido às não linearidades dos componentes de rádio e óticos, que constituem a ligação.

Na Figura 9 (b) pode-se observar uma implementação digital onde se devem salientar a introdução de unidades de conversão, de analógico para digital (ADC) e digital para analógico (DAC), nas *Base-stations* possibilitando a implementação de funções digitais no recetor e no emissor do *Central Office*. Após a digitalização do sinal RF, é produzido um sinal digital que pode ser usado para modular diretamente o laser. Uma observação importante é que a complexidade de *hardware* é toda passada para o *Central Office*, deixando as BS relativamente simples. [2]

A seguir apresenta-se uma comparação entre a transmissão analógica e a digital:

	Analog ROF	DROF
Optical transmission	Analog	Digital
Equipment cost	High	Very Low
Network cost	High	Very Low
RF Data rate	Fast	Slow
Transmission delay	Small	Large
Synchronization	Not required	Required

Figura 10: Comparação entre ROF analógico e digital [26].

Como se pode verificar pela tabela anterior, o preço do equipamento e da rede são mais baixos no *Digital Radio over Fiber*, no entanto esta forma de transmissão apresenta desvantagens ao nível da transmissão dos dados, uma vez que apresenta um atraso maior e requer sincronização, quando comparado com o *Radio Over Fiber*.

3.3. NG-PON2

Nos últimos anos tem-se verificado a uma clara evolução na implementação e desenvolvimento da fibra ótica até ao consumidor final (FTTH). Esta tecnologia tem permitido a oferta de aplicações a uma elevada taxa de transmissão, por cliente, e portanto é a tecnologia com maior capacidade de gerar mais receitas. Uma outra vantagem desta tecnologia é que esta permite uma maior eficiência operacional, quando comparada com outras tecnologias de acesso, devido à redução nas necessidades de manutenção e baixo consumo energético.

Como consequência do anterior, as redes FTTH foram desenvolvidas e standardizadas em todo o mundo, no entanto, a necessidade de largura de banda pelos utilizadores e pelos novos serviços obrigou esta tecnologia a evoluir, desde as GPON e XGPON para a NG-PON2. Desta forma e para reduzir os custos operacionais e proteger o investimento inicial, os operadores devem manter o planeamento dos comprimentos de onda, de modo a que haja coexistência entre as diferentes tecnologias PON. [27]

3.3.1. Requerimentos e Arquitetura de NG-PON2

Os requerimentos gerais para NG-PON2 são suportar pelo menos 40Gbit/s da capacidade agregada em *downstream* para aplicações comerciais e residenciais, mobile *backhaul* e outras aplicações. Foram consideradas várias opções para a implementação desta tecnologia, sendo que a escolhida pelo FSAN foi a TWDM-PON, uma vez que do

ponto de vista do operador esta é a que acarreta menos riscos, é a menos disruptiva e a mais barata, em comparação com as outras soluções. [27]

A arquitetura do TWDM-PON consiste em ‘empilhar’ quatro pares de comprimentos de onda (por exemplo: $\{\lambda_1, \lambda_5\}$, $\{\lambda_2, \lambda_6\}$, $\{\lambda_3, \lambda_7\}$ e $\{\lambda_4, \lambda_8\}$), como se pode verificar na Figura 11. Para que as instalações deste sistema sejam simples, as ONUs estão equipadas com transmissores e recetores sintonizáveis. O transmissor é sintonizável para qualquer uma das quatro frequências de *upstream* e o recetor é sintonizável para qualquer uma das quatro frequências de *downstream*. Com o intuito de aumentar o balanço de potência, em comparação com a arquitetura anterior, foram adicionados amplificadores óticos que são usados no lado da OLT para pré-amplificar os sinais que são enviados e amplificar os sinais recebidos. [28]

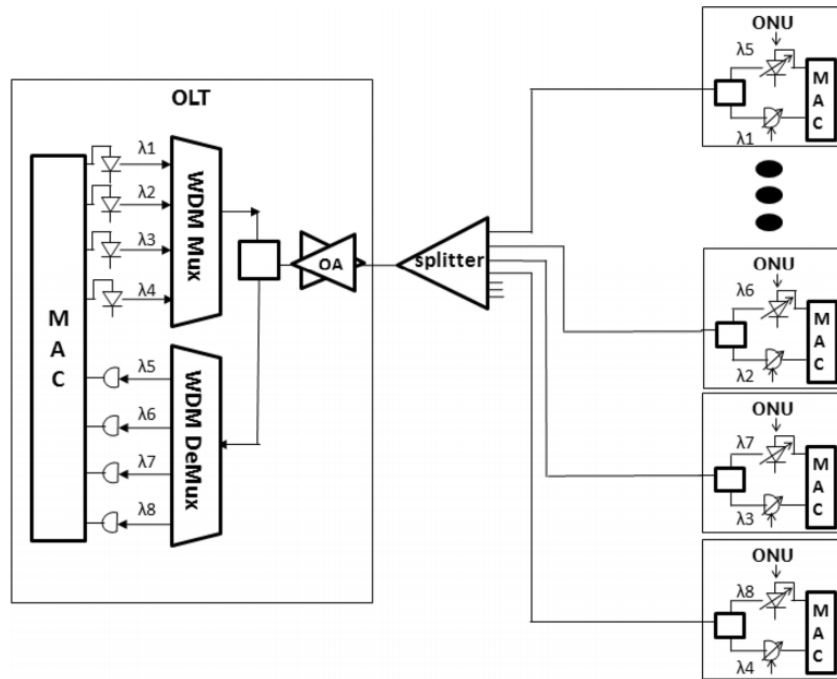


Figura 11: Diagrama do sistema TWDM-PON. [28]

Este novo sistema irá aumentar a capacidade das redes óticas passivas. Quando a coexistência das várias PON for considerada, será necessário tomar em atenção o planeamento dos comprimentos de onda, com os quais o NG-PON2 tem de coexistir. A Figura 12 mostra o espectro disponível para NG-PON2.

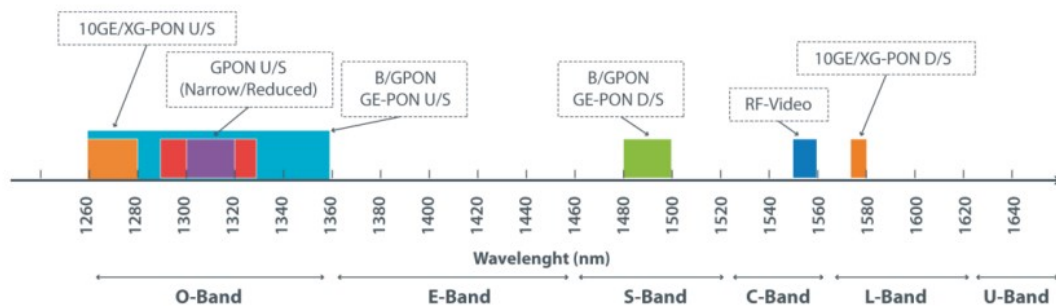


Figura 12: Planeamento de comprimentos de onda atual. [27]

Um outro fator que limita o espectro disponível são as características dos filtros existentes nos sistemas já desenvolvidos e instalados.

3.3.2. BOSA

Uma forma de implementar NG-PON2 é recorrendo ao uso de *transceivers*, que são dispositivos que incorporam um recetor e um transmissor no mesmo dispositivo.

Um destes dispositivos é o BOSA, que é usado como término da linha ótica (OLT), mas pode também ser utilizado nas redes de unidades óticas (ONUs). Este dispositivo é constituído por um transmissor, um recetor, um filtro WDM (não presente em todos) e uma fibra *pigtail* (fibra que possui um conector ótico numa das pontas e a fibra exposta na outra). Normalmente, este tipo de dispositivos necessita de alimentação externa e opera na zona dos *Gbit* por segundo. [29]

A questão importante neste tipo de dispositivos é que alguns deles possuem um filtro ótico que é usado para a seleção do canal e este filtro precisa de ser estudado, de modo a conhecer quais os parâmetros do mesmo que são mais influentes e que poderão prejudicar a receção ou transmissão de informação, tendo em conta uma implementação segundo NG-PON2.

3.4. Conclusões

Neste capítulo expuseram-se duas formas de transmissão de rádio através de fibra. Na secção 3.1 apresentou-se a transmissão analógica de rádio e na secção 3.2 mostrou-se a transmissão digital de sinais rádio através de fibra. Nele foram apresentadas ambas as tecnologias, assim como as suas vantagens e desvantagens, sendo que se pode concluir que a transmissão de rádio digitalizado é uma melhor alternativa que o ROF convencional porque apresenta um desempenho superior, uma implementação mais simples, é imune a não-linearidades da ligação e ainda apresenta uma gama dinâmica de funcionamento independente da distância de transmissão. [21]

Também neste capítulo, apresentou-se uma visão sumária sobre o NG-PON2 e sobre um tipo de equipamento utilizado nesta tecnologia. Mais à frente ir-se-á apresentar todo o estudo feito com o intuito de analisar o filtro que existe no BOSA.

4. Resultados de simulação e experimentais

Neste capítulo apresentam-se resultados obtidos através de simulação e também os resultados experimentais para implementações de rádio analógico sobre fibra, rádio digitalizado sobre fibra e o estudo do filtro de seleção de canal num BOSA utilizado na tecnologia NG-PON2. Para as duas implementações de rádio sobre fibra vai ser estudada a influência de alguns parâmetros no sistema, como por exemplo: tamanho de fibra utilizada no sistema, potência do laser, etc. Já no caso do estudo do filtro irão ser testados vários tipos de filtro e em cada um será observada qual a resposta do sistema, em termos do BER, para várias ordens e vários tamanhos de fibra aplicada no sistema.

As simulações foram realizadas recorrendo ao *software VPIPhotonics*®.

Em relação à métrica utilizada considerou-se o EVM (*Error Vector Magnitude*), que se define como a potência média do vetor erro, normalizado à potência do sinal, sendo o vetor erro um vetor no plano *IQ* entre os pontos ideais da constelação e os pontos recebidos. [30]

O valor limite da métrica de avaliação utilizada, 12%, está de acordo com o *standard* definido para o formato de modulação utilizado [31].

4.1. Resultados de simulação de Radio Over Fiber

Nesta secção serão apresentados os esquemáticos e os resultados que foram obtidos através de simulações do rádio sobre fibra. Os sistemas foram simulados com os parâmetros globais que se podem encontrar na Tabela 1 e cujos valores estão de acordo com as características dos dispositivos utilizados no *setup* experimental.

Tabela 1: Parâmetros globais do sistema.

Parâmetro	Valor	Unidade
Frequência da Portadora	5×10^9	Hz
Bit Rate à saída do Transmissor (<i>mQAM</i>)	1.25×10^9	bit/s
Modulação	16-QAM	-
MZM <i>Extinction Ratio</i>	25	dB
Largura de linha do Laser	100×10^3	Hz
Coeficiente de atenuação	0.2×10^{-3}	dB/m
Dispersão na Fibra	16	ps/(nm*km)
Comprimento de onda do laser	1550	nm

Na Figura 13 pode-se observar o esquemático do sistema simulado.

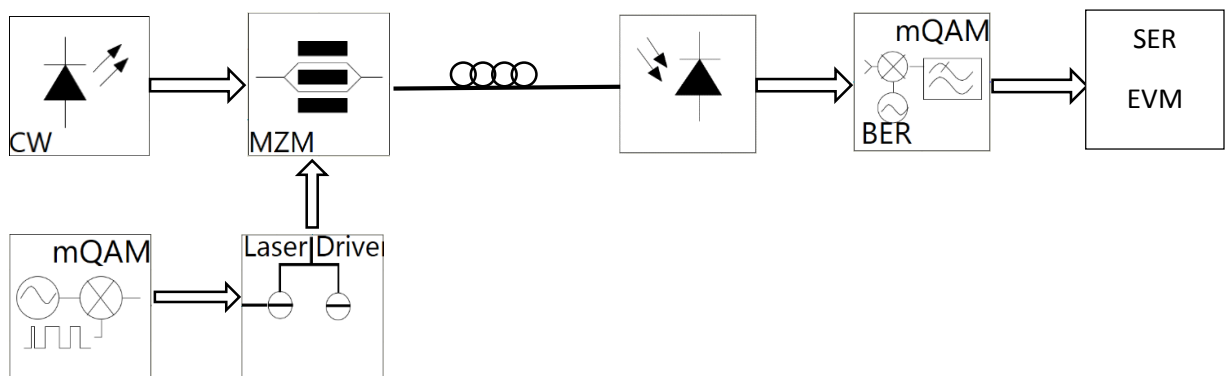


Figura 13: Esquemático utilizado para simular o sistema de Rádio sobre fibra.

4.1.1. Caracterização do MZM

O modelo que simula um modulador *Mach-Zehnder* tem duas entradas: uma do *Laser* e outra do *Laser Drive*, em que este último apresenta dois parâmetros, *Bias* e *Drive Amplitude*, que são usados para alterar o ponto de polarização da curva do MZM e a amplitude do sinal que entra no MZM, respetivamente.

Para se determinar a resposta eletro-óptica do MZM, começou-se por correr uma simulação em que se faz variar o valor do *Bias* e se mantém o valor do *Drive Amplitude* fixo em 0.1. O *software* de simulação utilizado considera que o *Drive Amplitude* corresponde à multiplicação da excursão pico a pico da saída do transmissor elétrico do sinal m-QAM (com amplitude de 10 V), por um fator multiplicativo (o valor apresentado neste trabalho é sempre o fator multiplicativo).

Na Figura 14 apresentam-se os valores da potência à saída do *Mach-Zehnder* (μW) em função do valor do *Bias*, com *Drive Amplitude* igual a 0.1.

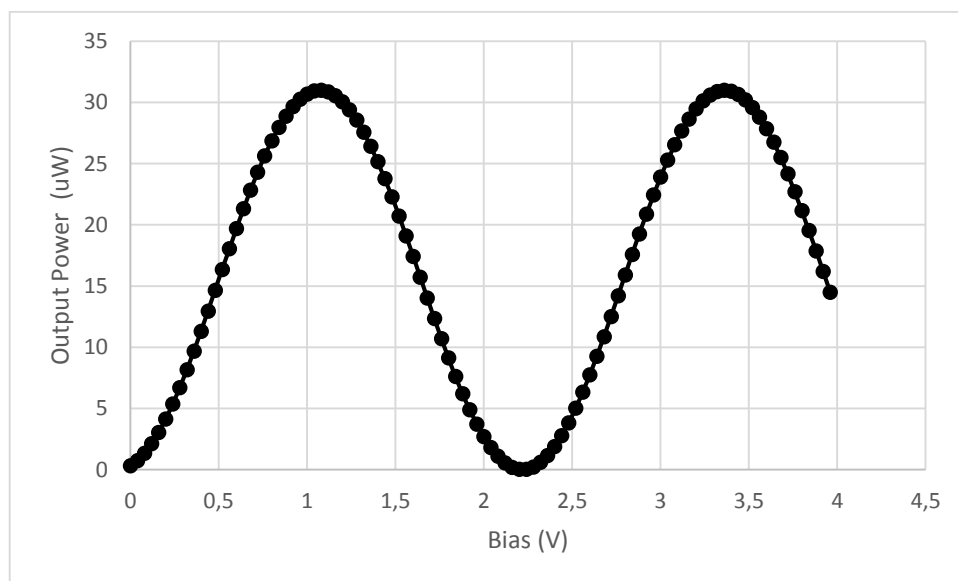


Figura 14: Potência à saída do MZM em função do Bias (V).

Da análise da Figura 14 verificou-se que seria mais vantajoso usar um *Bias* na zona linear da curva característica do *MZM* e para esse ponto escolheu-se 0.5 (V) como valor de referência.

4.1.2. Desempenho do sistema em *Back-to-Back*

Nesta secção vai-se estudar o desempenho do sistema sem que haja introdução de fibra. Em primeiro lugar, é necessário otimizar o *Drive Amplitude*. Para isso, fixou-se a potência do laser, e obteve-se o EVM em função da potência ótica recebida (utilizando um atenuador), para diferentes valores de *Drive Amplitude*. Os resultados desta experiência estão presentes na Figura 15. Nos resultados que se seguem considerou-se um valor de *Drive Amplitude* de 0.1. Para valores superiores, como se observa na Figura 15, já temos uma degradação do desempenho, associado à não-linearidade da resposta do modulador.

Para analisar o impacto da potência de emissão no sistema, simulou-se um cenário em que se fixa o valor do *Drive Amplitude* e se vai alterando a potência de emissão do laser. Este cenário foi testado e os resultados estão presentes na Figura 16.

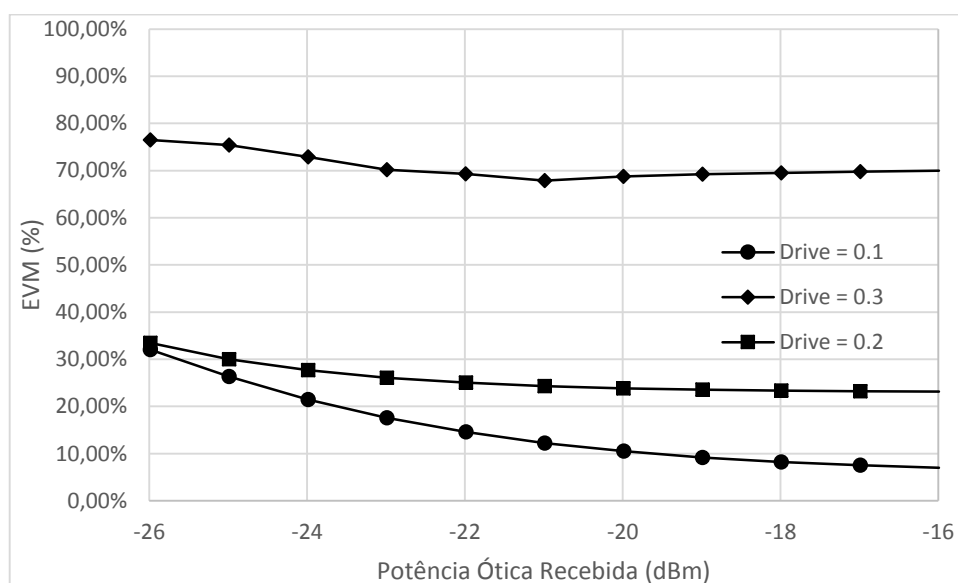


Figura 15: EVM em função da potência ótica recebida (dBm), para diferentes valores do *Drive Amplitude*.

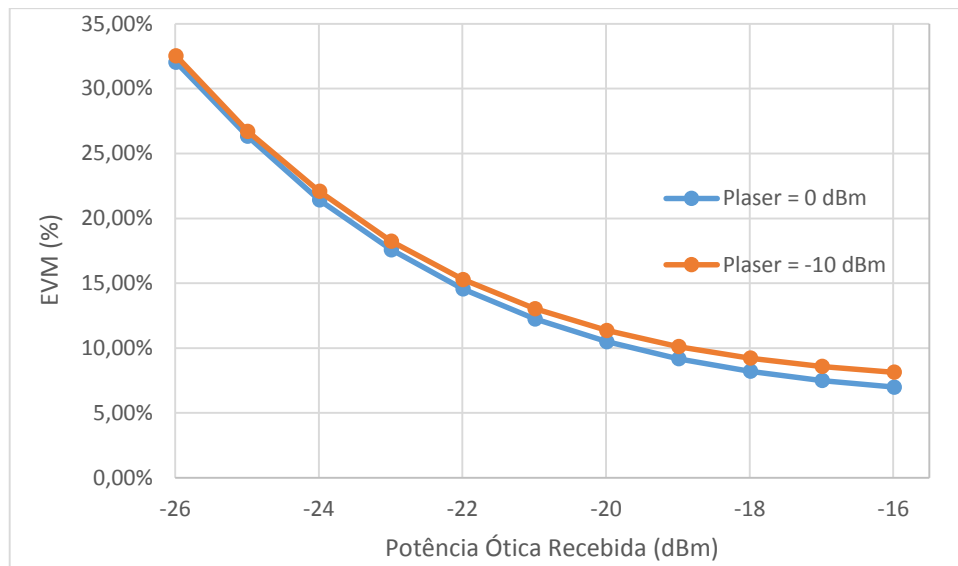


Figura 16: EVM em função da potência ótica recebida (dBm), para diferentes potências de emissão do Laser.

Como se pode observar na Figura 16, a diminuição da potência de emissão do laser não provoca alterações significativas no desempenho do sistema, para as mesmas potências óticas recebidas, no entanto a degradação observada para menores potências de emissão do laser (mantendo o *Drive Amplitude* constante) tem a ver com o aumento do impacto da resposta não-linear do modulador.

Caso a potência de emissão do laser continue a ser diminuída, esta irá acompanhar a tendência apresentada nas curvas da Figura 16. No entanto, para que os resultados sejam coerentes com o testado no laboratório, em que se usou uma potência de laser igual a 0 dBm, vai-se também usar este valor nas simulações.

4.1.3. Caracterização do Fotodíodo

Nesta parte do texto vai-se caracterizar o fotodíodo ao nível do ruído térmico e do ganho que este apresenta. Este estudo é importante uma vez que não se conhece exatamente qual o valor destes dois parâmetros no fotodíodo utilizado em ambiente laboratorial.

Para que as simulações estejam o mais próximas possível do observado no laboratório, vai-se variar o valor do ruído térmico do APD, para vários valores típicos do ganho [32]. O anterior será efetuado tendo em conta que nas experiências laboratoriais realizadas verificou-se que o EVM ultrapassa os 12% quando a potência ótica recebida baixa dos -21 dBm (como se poderá verificar mais à frente).

Depois de simular o sistema como descrito anteriormente, decidiu-se utilizar um ganho do APD igual a 40, uma vez que este se apresenta como um valor bastante usual para o ganho destes dispositivos. Tendo-se escolhido o ganho igual a 40, então o valor do ruído térmico que corresponde a um EVM de 12% é $6.7 \times 10^{-10} \frac{A}{\sqrt{Hz}}$. A largura de banda considerada no foto recetor é a suficiente para que seja apanhada a frequência da portadora do sinal mais meia largura de banda do canal.

4.1.4. Introdução de Fibra

Depois da análise *back-to-back*, será agora importante introduzir fibra e estudar como será o comportamento do sistema. Para tal testaram-se 3 cenários diferentes: sem fibra, com 20 km de fibra e com 40 km. Os resultados apresentam-se na Figura 17.

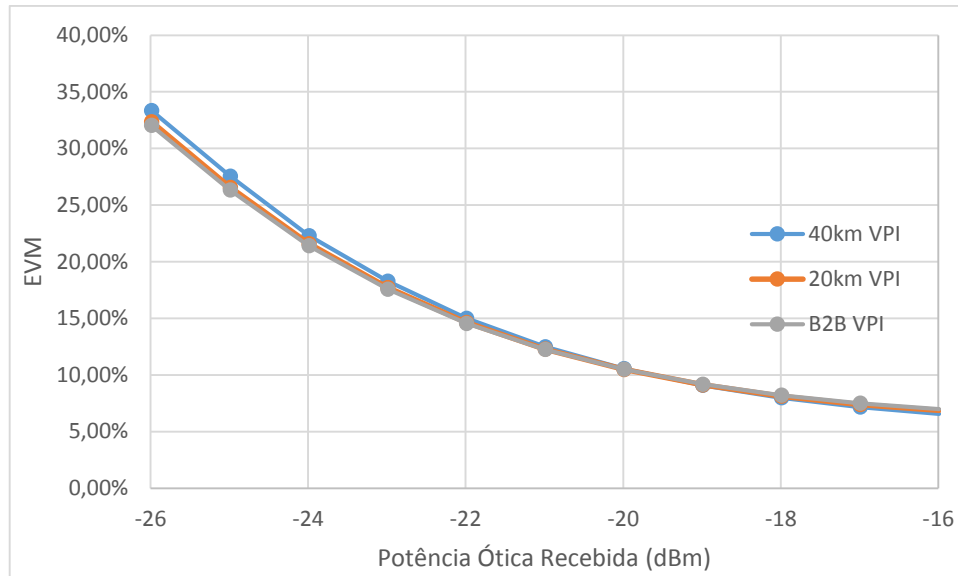


Figura 17: EVM em função da potência ótica recebida (dBm), para diferentes comprimentos de fibra.

Analisando a Figura 17, verifica-se que o aumento do comprimento da fibra até aos 40 km não introduz degradação evidente no desempenho. Os valores do EVM são bastante semelhantes até aos -22 dBm e só a partir daí se afastam ligeiramente. No máximo, observa-se uma discrepância de 2% entre a curva de B2B e 40 km. Esta pequena diferença deve-se à distorção associada à dispersão da fibra, que é reduzida para o ritmo de transmissão e comprimento considerados.

Neste teste não se foi abaixo dos -26 dBm para a potência ótica recebida, uma vez que no trabalho de laboratório também não se conseguiu ir abaixo deste valor.

4.2. Resultados Laboratoriais de Rádio Sobre Fibra

A montagem experimental de transmissão de rádio sobre fibra é apresentada na Figura 18. Começando pelo gerador de sinal RF (1), este é responsável pela geração do sinal em rádio frequência que será depois aplicado no modulador (3); outro componente é o laser (2), que também tem a sua saída ligada à entrada do modulador, sendo que este último tem a sua saída ligada à fibra (4) e esta está ligada ao atenuador (5). De seguida, o sinal ótico à saída do atenuador será convertido para o domínio elétrico pelo APD (6) e este mesmo sinal é lido pelo osciloscópio digital (7), de onde se retira uma porção do sinal no tempo, recorrendo ao *software* OCR (8) e esta amostra do sinal será depois analisada no VPI®, para determinar o EVM.

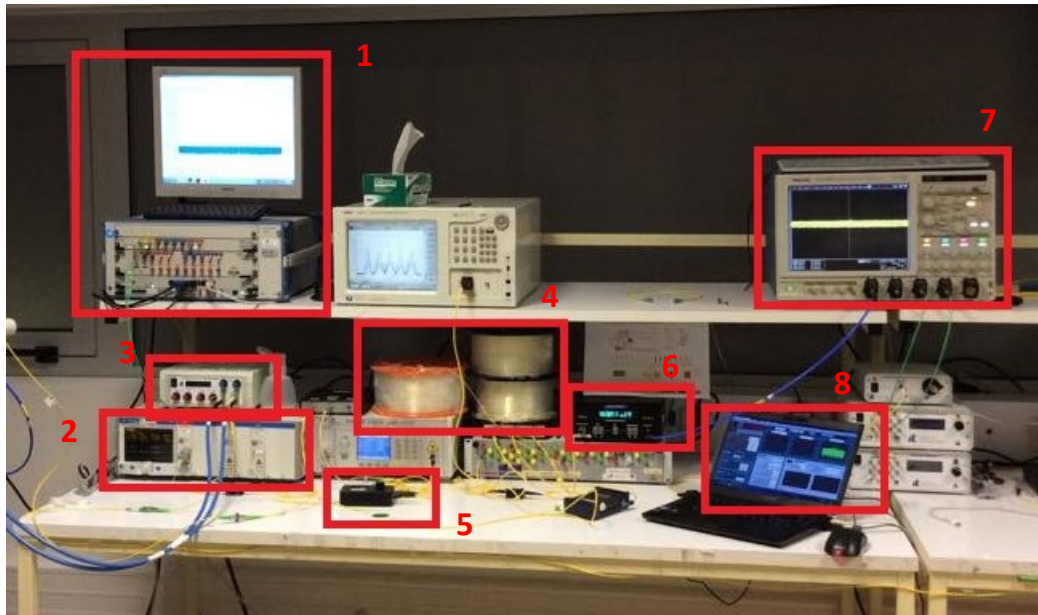


Figura 18: Montagem experimental de rádio analógico sobre fibra.

Na Tabela 2 apresentam-se os valores dos parâmetros experimentais que foram utilizados nesta montagem.

Tabela 2: parâmetros dos componentes experimentais da montagem de ROF.

Parâmetro	Valor	Unidade
Frequência da Portadora	5×10^9	Hz
Bit Rate	1.25×10^9	bit/s
Modulação	16-QAM	-
MZM Extinction Ratio	25	dB
Largura de linha do Laser	100×10^3	Hz
Coeficiente de atenuação	0.2×10^{-3}	dB/m
Dispersão na Fibra	~ 16	ps/(nm*km)
Comprimento de onda do laser	1550	nm

A Figura 19, Figura 20 e Figura 21 apresentam os resultados obtidos para Rádio analógico sobre Fibra, usando diferentes comprimentos de fibra, com uma portadora de frequência igual a 5GHz e *bitrate* de 1,25 Gb/s. Observando as figuras referidas, pode-se verificar que a tendência dos resultados práticos obtidos são consistentes com os que foram obtidos por simulação. No entanto, existem diferenças que são justificadas por tanto o ponto de funcionamento do modulador, como a amplitude da tensão RF e o valor do *Extinction Ratio* não serem exatamente iguais aos valores usados em simulação. À medida que se aumenta o tamanho da fibra observa-se que a sensibilidade do sistema vai diminuindo.

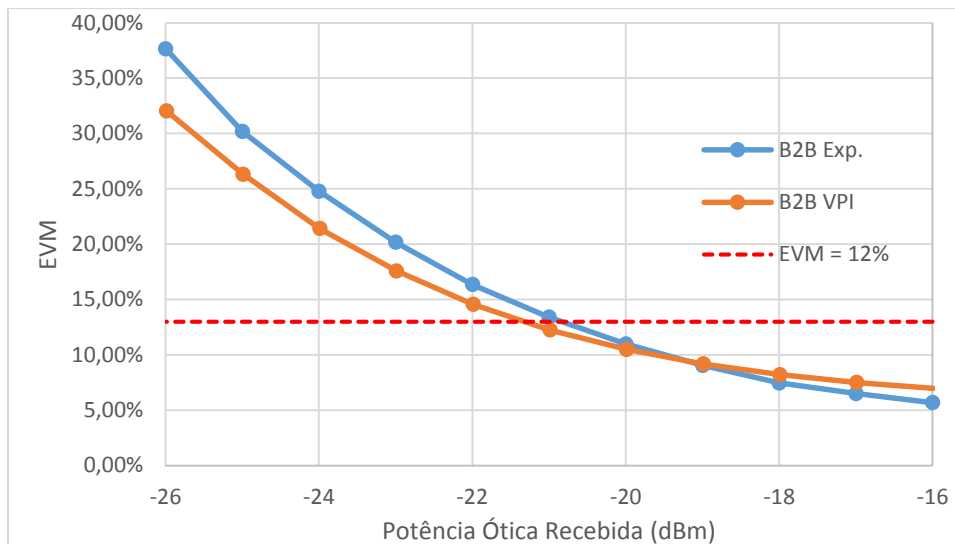


Figura 19: EVM em função da potência ótica recebida, para 0 km de fibra.

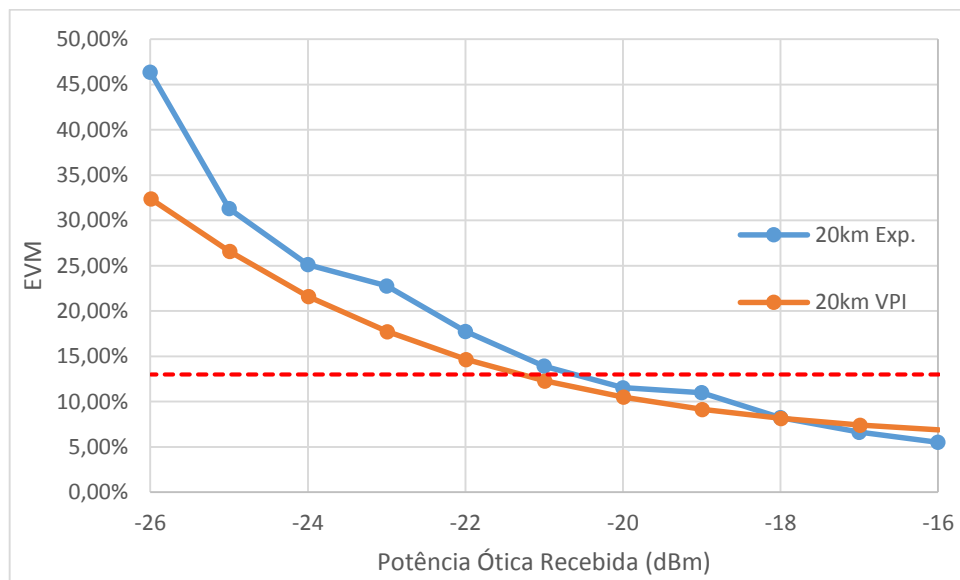


Figura 20: EVM em função da potência ótica recebida, para 20km de fibra.

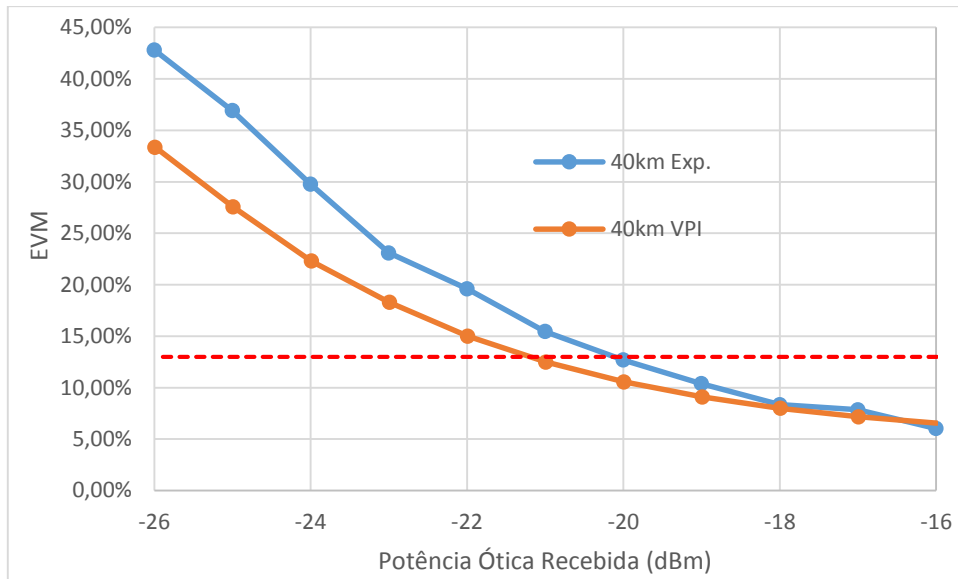


Figura 21: EVM em função da potência óptica recebida, para 40 km de fibra.

4.3. Resultados de simulação de *Digital Radio Over Fiber*

Nesta secção ir-se-á estudar o comportamento de um sistema de transmissão de rádio digitalizado através de fibra. Na Figura 22 pode-se observar um diagrama do sistema completo de *Digital Radio over Fiber*, sendo que as alterações mais relevantes, quando comparado com o *Radio over Fiber*, é a introdução de uma ADC no emissor, com um *Coder NRZ*, e a introdução de uma DAC no recetor. Na Tabela 3 estão presentes os valores dos parâmetros utilizados nas simulações do sistema.

Tabela 3: Parâmetros utilizados na simulação de rádio digital sobre fibra.

Parâmetro	Valor	Unidade
Frequência da Portadora	5×10^9	Hz
Frequência Intermédia	400×10^6	HZ
Bit Rate à saída do Transmissor (mQAM)	1.25×10^9	bit/s
Modulação	16-QAM	-
MZM <i>Extinction Ratio</i>	25	dB
Largura de linha do Laser	100×10^3	Hz
Coeficiente de atenuação	0.2×10^{-3}	dB/m
Dispersão na Fibra	16	ps/(nm*km)
Comprimento de onda do laser	1550	nm

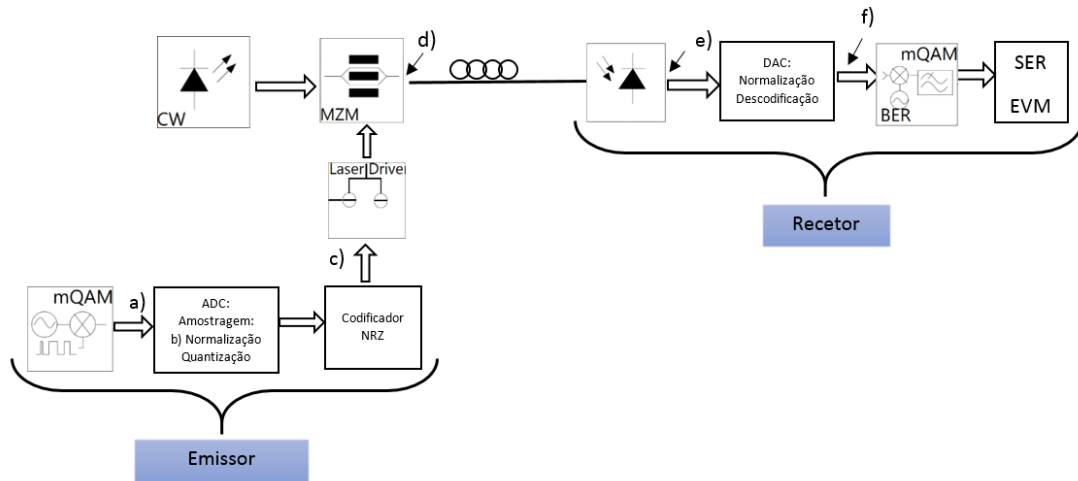


Figura 22: Diagrama de blocos do sistema rádio digital sobre fibra.

Da Figura 23 à Figura 28 apresentam-se os sinais nos diferentes pontos do esquemático anterior, onde a amostra temporal é sempre de 10 ns.

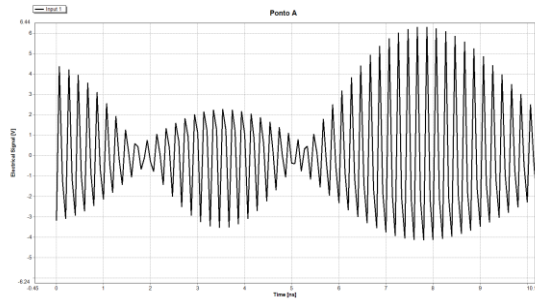


Figura 23: Sinal QAM gerado (ponto a).

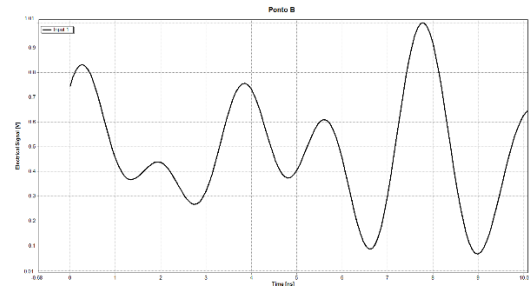


Figura 24: Sinal após a normalização (ponto b).

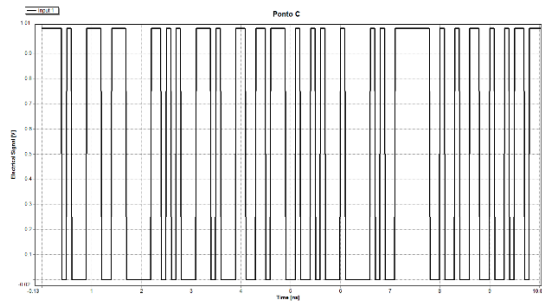


Figura 25: Sinal após o codificador NRZ (ponto c).

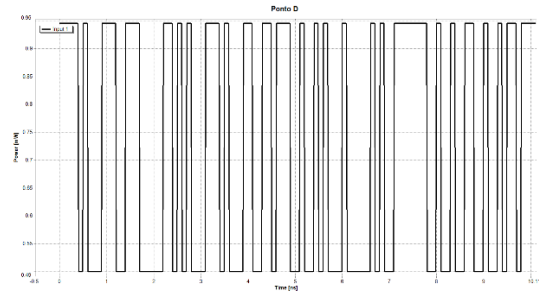


Figura 26: Sinal antes da fibra (ponto d).

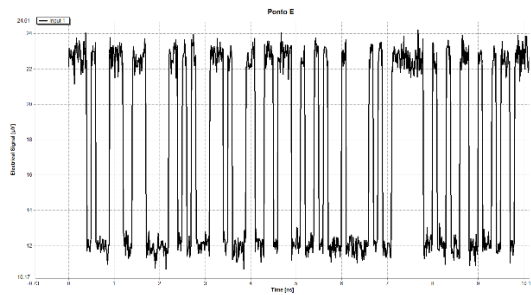


Figura 27: Sinal depois do recetor (ponto e).

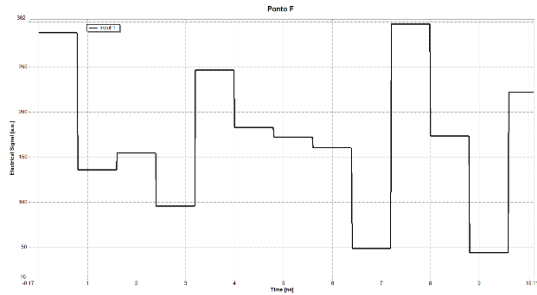


Figura 28: Sinal decodificado (ponto f).

Para começar o estudo deste sistema fez-se um *sweep* ao *Drive Amplitude* (valores de 0 a 1) e observou-se que para valores superiores a 0.1 e menores que 0.7 desta variável, o EVM é constante uma vez que a ADC limita a sua excursão de saída a valores de tensão entre 0 a 1 V. Uma outra verificação foi que à medida que se aumenta o valor do *Drive Amplitude* a potência ótica recebida também aumenta. Obviamente que este resultado é consistente com o esperado porque o aumento da amplitude do sinal RF implica o aumento da potência ótica transmitida.

Tendo em conta as simulações anteriores, fixou-se *Drive Amplitude* em 0.5 e V_{bias} em 0.5 (V) e serão estes valores os que serão usados nas próximas simulações.

De acordo com o que foi feito no ROF, é necessário otimizar os valores usados em simulação do ganho do APD e do seu ruído térmico para que os valores obtidos, em simulação, sejam o mais próximos possível dos obtidos experimentalmente.

Seguidamente alterou-se a resolução da *ADC* e *DAC* e fez-se um *sweep* para observar impacto do número de *bits* no EVM, sendo que os resultados desta experiência estão representados na Figura 29.

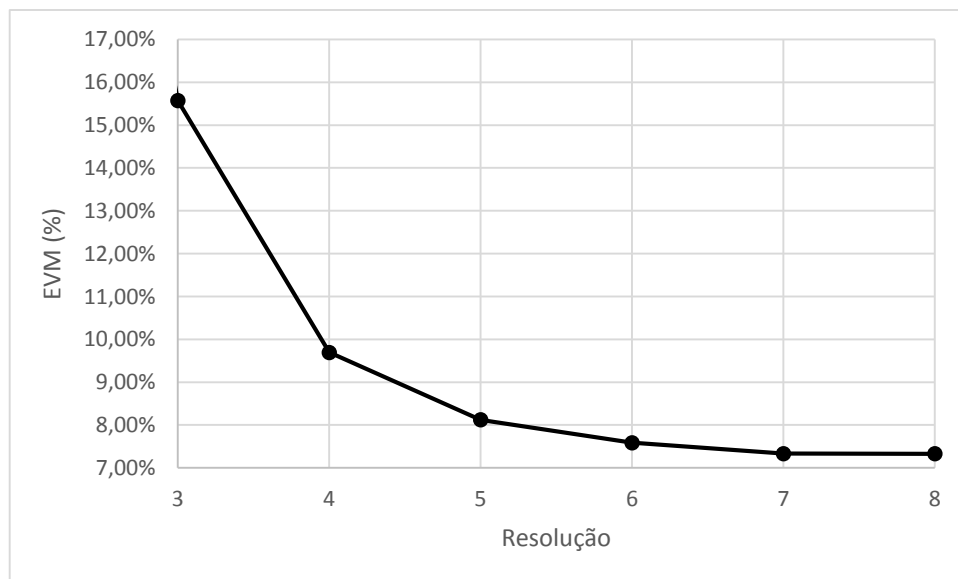


Figura 29: EVM em função do número de bits.

Na Figura 29 representou-se a variação do EVM em função do aumento de número de *bits*. Como seria de esperar, o aumento do número de bits irá aumentar a imunidade do sistema a erros.

Seguidamente introduziu-se fibra e verificou-se como se comporta o sistema. Testou-se o sistema com dois comprimentos de fibra e para duas diferentes resoluções: 4 e 8 bits. Os resultados obtidos estão presentes na Figura 30 e Figura 31.

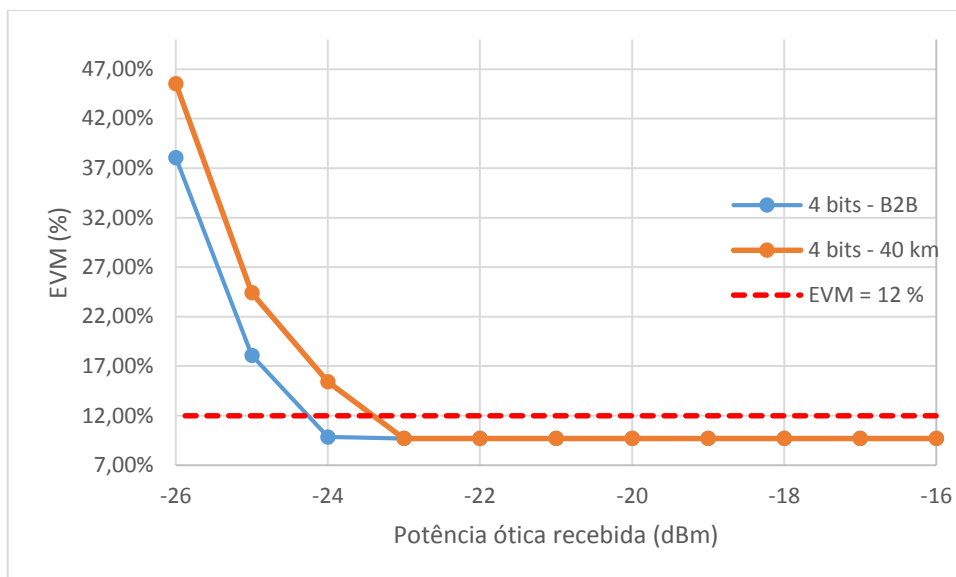


Figura 30: EVM em função da potência ótica recebida (dBm), com resolução de 4 bits, para 40km e 0 km.

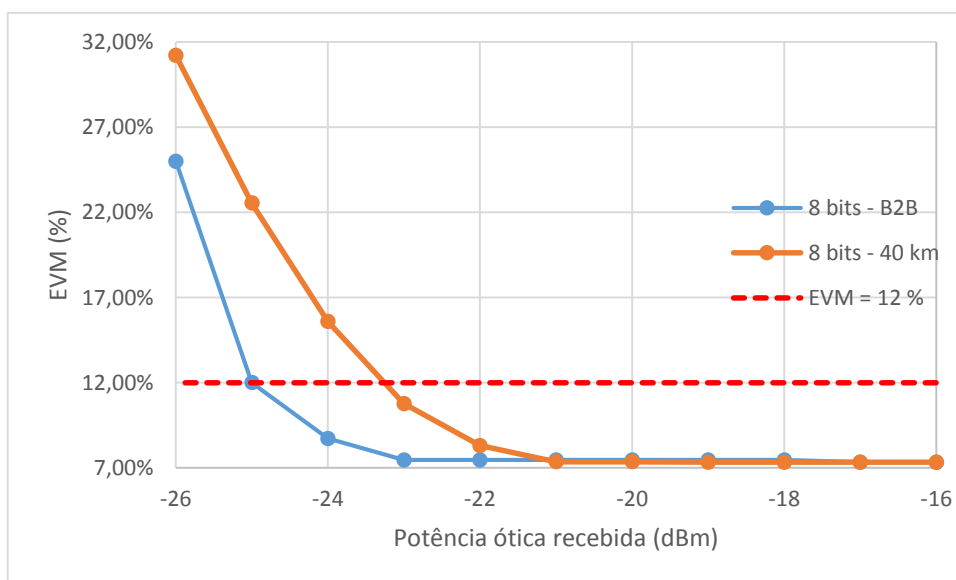


Figura 31: EVM em função da potência ótica recebida (dBm), com resolução de 8 bits, para 40km e 0 km.

Ao analisar a Figura 30 e a Figura 31 constata-se que um aumento do número de *bits* vem beneficiar o sistema, desde que as potências óticas recebidas não sejam

muito baixas. De facto, quanto maior for o número de bits de resolução, menor será o valor do EVM observado até aos -22 dBm.

Quando o valor da potência ótica recebida já baixa dos -23 dBm, verifica-se que o sistema piora bastante o EVM nos dois casos, sendo que quanto maior for o número de bits de resolução, mais o sistema irá piorar. Este facto leva a concluir que existe um valor mínimo de potência recebida para o qual o sistema tem um comportamento sempre constante e bastante razoável em termos de erros.

O aumento do comprimento da fibra irá obviamente aumentar a dispersão no sinal e por isso o sinal recebido tem mais erros do que quando o sistema não tem fibra.

Uma outra verificação interessante é que quanto maior for o *bitrate* na fibra, mais rapidamente o sinal se degrada. Esta constatação é facilmente observável quando se comparam as curvas de 4 e 8 bits, para 40 km: a partir dos -21 dBm, o valor do EVM na curva de 8 bits sobe quando comparado com a curva de 4 bits (para os dois comprimentos da fibra). Este fenómeno pode ser explicado por duas causas: o aumento do *bitrate* na fibra que conduzirá ao aumento da dispersão e o elevado número de níveis de quantificação dos sinais com grande número de bits. Quanto maior for o número de níveis de quantificação de um sinal, menor será a amplitude de cada nível e por isso, estará cada vez mais suscetível a sofrer erros devido ao ruído. Um outro facto que poderá explicar o verificado é a largura espectral que aumenta com o aumento do número de bits.

4.4. Resultados Laboratoriais de DROF e comparação com resultados teóricos

A montagem experimental de transmissão de rádio digital sobre fibra é apresentado Figura 32. Esta é constituída pelo gerador de sinal digital (1), que é responsável pela geração do sinal digital (este sinal é uma amostra proveniente do VPI) que será depois aplicado no modulador (3). O laser (2) também tem a sua saída ligada à entrada do modulador, sendo que este último tem a sua saída ligada à fibra (4) e esta estará ligada depois ao atenuador (5). De seguida, o sinal ótico à saída do atenuador será convertido para o domínio elétrico pelo APD (6). Este mesmo sinal é lido pelo osciloscópio digital (7), de onde se retira uma porção do sinal no tempo, recorrendo ao *software* OCR (8) e esta amostra será depois analisada no VPI®, para determinar o EVM.

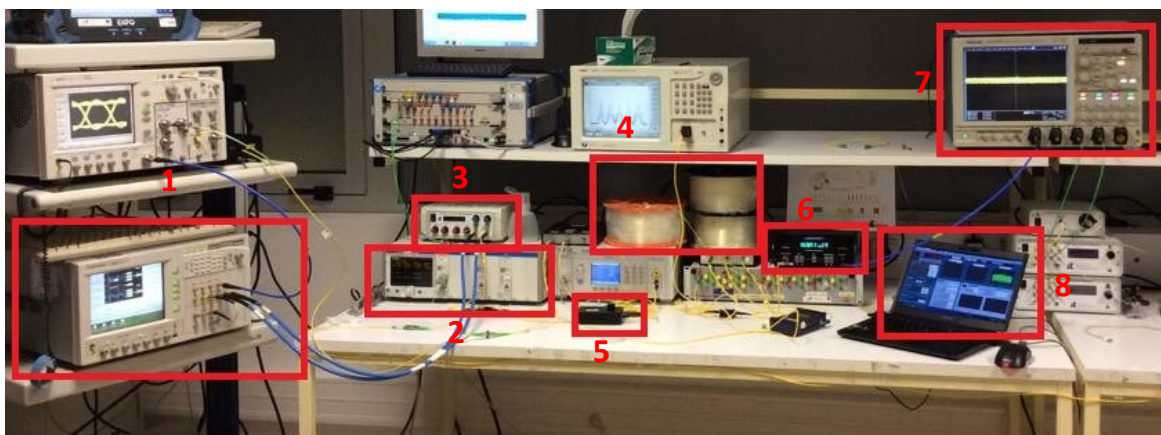


Figura 32: Montagem experimental de rádio digitalizado sobre fibra.

Na Tabela 4 apresentam-se os valores para a maioria dos parâmetros experimentais que foram utilizados nesta montagem.

Depois da montagem do *setup*, variou-se a atenuação antes do recetor e calculou-se o EVM para cada valor da potência ótica recebida. A Figura 33 e a Figura 34 apresentam os resultados obtidos para Rádio Digital sobre Fibra, usando diferentes comprimentos de fibra e diferente número de bits de resolução, com uma portadora de frequência igual a 400MHz e *bitrate* de 1,25 GHz (no emissor).

Tabela 4: Parâmetros dos componentes experimentais da montagem de DROF.

Parâmetro	Valor	Unidade
Frequência da Portadora	5×10^9	Hz
Frequência Intermédia	400×10^6	HZ
Modulação	16-QAM	-
<i>MZM Extinction Ratio</i>	25	dB
Largura de linha do Laser	100×10^3	Hz
Coeficiente de atenuação	0.2×10^{-3}	dB/m
Dispersão na Fibra	~ 16	ps/(nm*km)

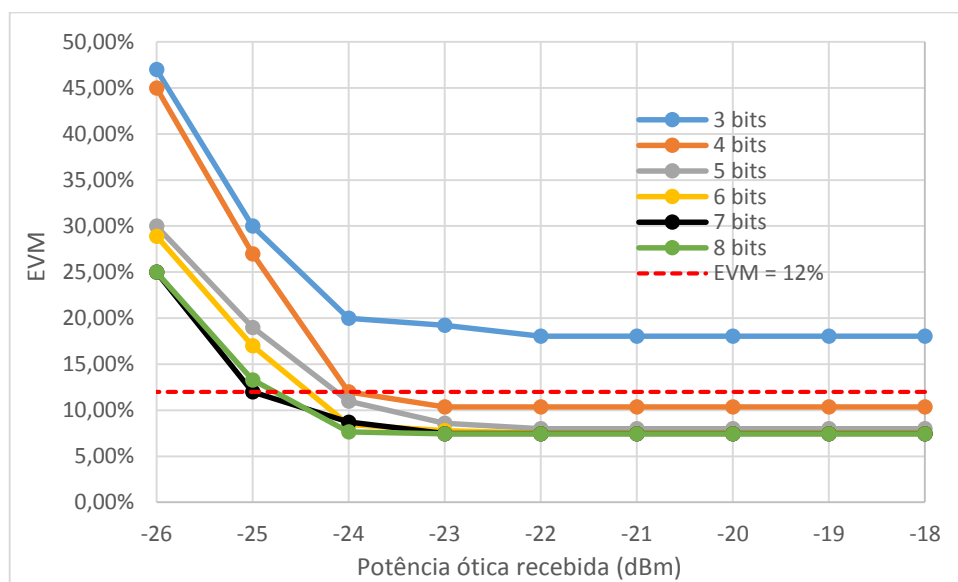


Figura 33: EVM em função da Potência ótica recebida (dBm), para 0 km de fibra.

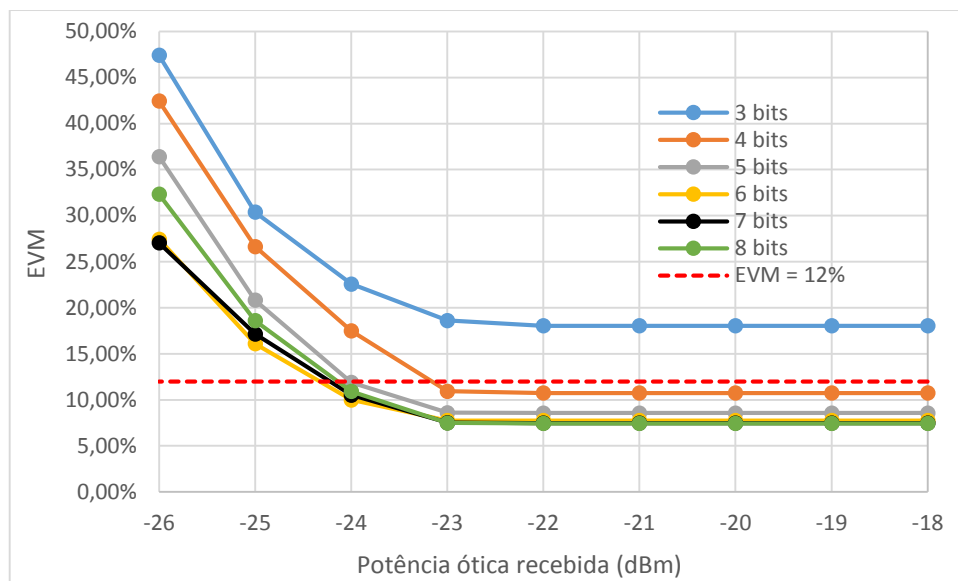


Figura 34: EVM em função da potência óptica recebida (dBm), para 40km de fibra.

A partir da análise dos dados da Figura 33 e Figura 34, podem-se tirar algumas conclusões bastante interessantes sobre a transmissão de rádio digital sobre fibra: em primeiro lugar referir que este sistema tem um comportamento típico de um sistema digital: não é tão afetado pelo ruído até se atingir um certo nível de potência, sendo o desempenho do sistema constante. Para 40 km verificou-se que até -23 dBm de potência recebida o desempenho seria constante e que para *B2B* esse valor se alteraria para -24 dBm. A partir desta gama de valores a quantidade de erros no sistema aumenta bastante.

Uma outra interessante conclusão, que vem provar o que já tinha sido verificado teoricamente, é que o aumento do número de bits de resolução irá conferir ao sistema uma maior imunidade a erros, quando comparado com outros valores de resolução menores.

De seguida apresenta-se uma comparação entre os valores obtidos experimentalmente e os obtidos através de simulação no VPI®. Estas comparações podem ser observadas na Figura 35 e Figura 36.

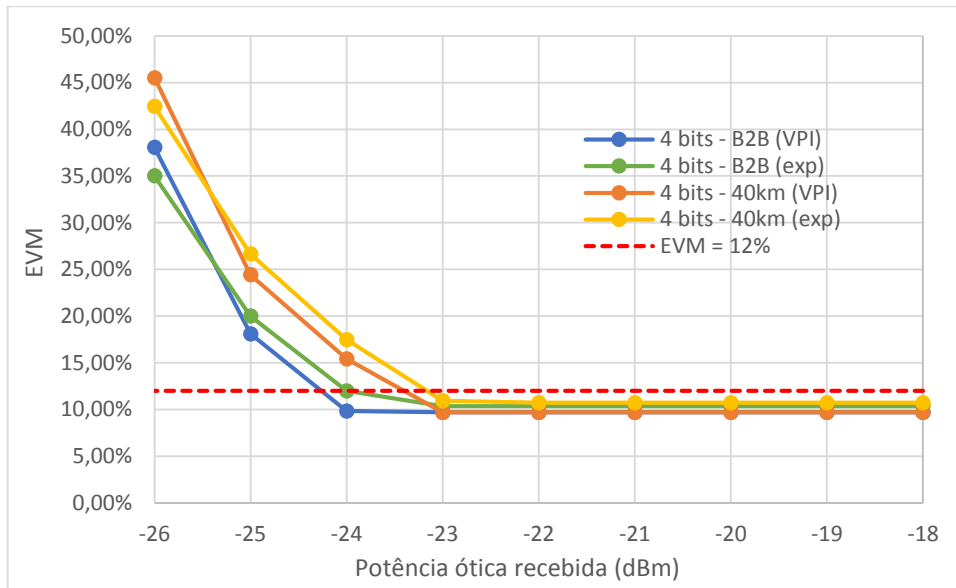


Figura 35: Comparação dos resultados teóricos e experimentais, para 4 bits.

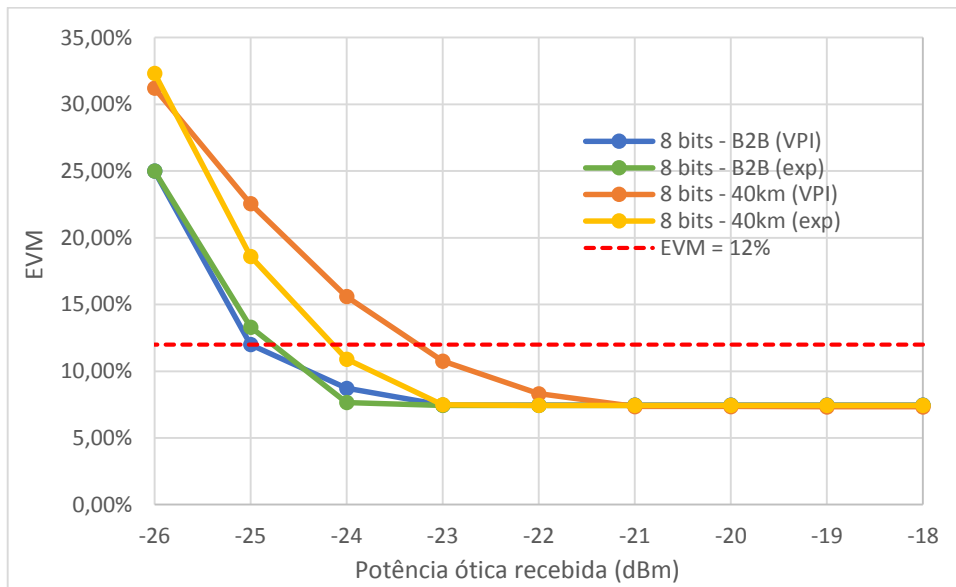


Figura 36: Comparação dos resultados teóricos e experimentais, para 8 bits.

No geral, o comportamento do sistema é consistente com o observado nos testes realizados no simulador: verifica-se a existência de uma potência mínima para que o sistema possa funcionar com o mínimo de erros e verifica-se o aumento rápido dos erros quando a potência ótica recebida vai abaixo desse valor. No entanto, existem diferenças que são justificadas por tanto o ponto de funcionamento do modulador, como a amplitude da tensão RF e o valor do *Extinction Ratio* não serem exatamente iguais aos valores usados em simulação.

4.5. Estudo do filtro de seleção de canal em NG-PON2

O objetivo deste capítulo é estudar o processo de filtragem num cenário NG-PON2.

Para efetuar o estudo referido utilizou-se o esquemático apresentado Figura 37:

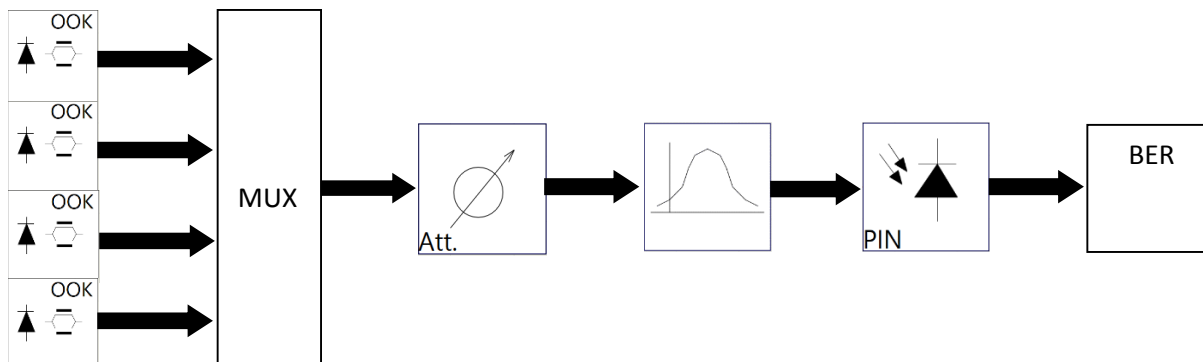


Figura 37: Esquemático simulado de NG-PON2.

Na Figura 37 pode-se verificar que existem 4 emissores, que simulam os 4 canais de *downstream* da tecnologia NG-PON2 e, que estão nas seguintes frequências: 187.5 THz, 187.6 THz, 187.7 THz e 187.8 THz (ou seja, há uma separação de 100 GHz entre cada canal) [33]. Na simulação utilizaram-se quatro blocos de emissão, em que cada um desses blocos é constituído por um laser, um modulador *Mach-Zehnder*, um codificador e uma fonte de ruído. Estas quatro fontes óticas foram multiplexadas recorrendo a um *multiplexer* ótico e depois os sinais foram atenuados. De modo a que na receção fosse possível seleccionar qual o canal, a partir do qual se pretendia calcular o BER, utilizou-se um filtro ótico seguido de um fotodetetor e um bloco de cálculo de BER.

A maioria dos parâmetros utilizados estão de acordo com o *standard* de NG-PON2 [33]. No entanto alguns parâmetros, como a largura de banda do filtro, a densidade de potência do ruído e a potência ótica recebida foram definidos de acordo com a realização experimental deste sistema, que se poderá fazer no futuro.

Na Tabela 5 apresentam-se alguns parâmetros relevantes do sistema.

Tabela 5: Parâmetros mais relevantes do esquemático de NG-PON2.

Parâmetro	Valor	Unidade
Potência do Laser	6	dBm
Largura de Linha	100×10^6	Hz
Densidade de Potência do Ruído	1×10^{-16}	W/Hz
Tipo de Modulação	NRZ	-
Taxa de Transmissão	10	Gb/s
Responsividade do PIN	0.8	-
Ruído Térmico PIN	10×10^{-12}	$\frac{A}{\sqrt{Hz}}$
Coeficiente de atenuação	0.2×10^{-3}	dB/m
Dispersão na Fibra	16	ps/(nm*km)

A métrica utilizada neste estudo foi o BER, que se define como a razão de bits errados em relação ao número total de bits que são recebidos durante a transmissão. [34] O valor máximo para esta métrica está de acordo com o *standard* definido para o formato de modulação utilizado [31]

Os testes que se realizaram com este esquemático têm o intuito de estudar o impacto da resposta (amplitude e fase) do filtro ótico e a sua dessintonia no desempenho do sistema, para descobrir até onde se podem 'relaxar' os parâmetros do filtro responsável pela seleção do canal e obter resultados aceitáveis. Testaram-se 3 tipos de filtro: filtro de *Bessel*, filtro *Butterworth* e filtro gaussiano. Em cada tipo de filtro verificou-se qual o impacto da dessintonização (em inglês, *detuning*), ou seja verificou-se qual o desvio máximo da frequência central que o filtro pode sofrer até atingir um *BER* igual a 10^{-3} . Para os testes a seguir apresentados, decidiu-se centrar o filtro num dos canais centrais, uma vez que se verificou que nestes a interferência seria superior (devido à maior diafonia inter-canal) e portanto os resultados seriam sempre piores.

Para compreender os resultados obtidos para cada filtro, deve-se analisar a sua resposta em amplitude e fase, ou a obtida a partir desta, o atraso temporal introduzido, que pode ser obtido através da derivada da fase do filtro. [35]

4.5.1. Filtro de *Bessel*

Começou-se por testar o filtro de *Bessel*, sendo que se simulou o impacto da dessintonia (para diferentes ordens do filtro), observou-se o impacto do aumento da ordem na magnitude do filtro e no atraso e, por fim, testou-se o impacto da introdução de fibra ótica no sistema. Para a dessintonia do filtro, em função da sua ordem, obtiveram-se os resultados presentes na Figura 38; também se apresenta a magnitude deste filtro, na Figura 39 e Figura 40 (nestas figuras apresenta-se uma escala diferente das restantes por facilidade de simulação), assim como o atraso de fase, na Figura 41.

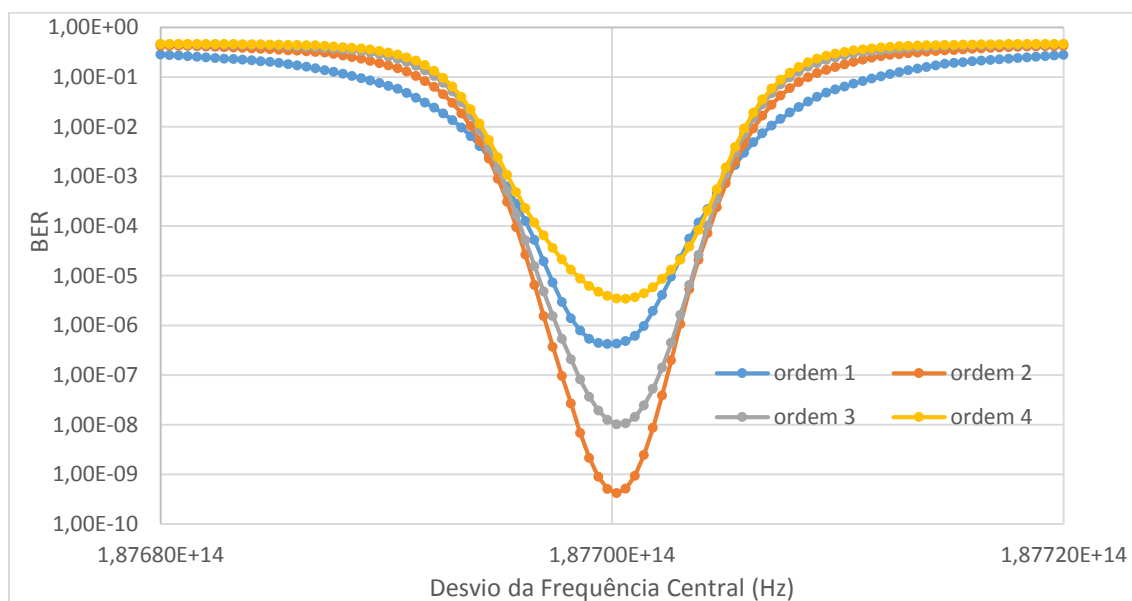


Figura 38: BER em função do desvio da frequência, para várias ordens do filtro de *Bessel*.

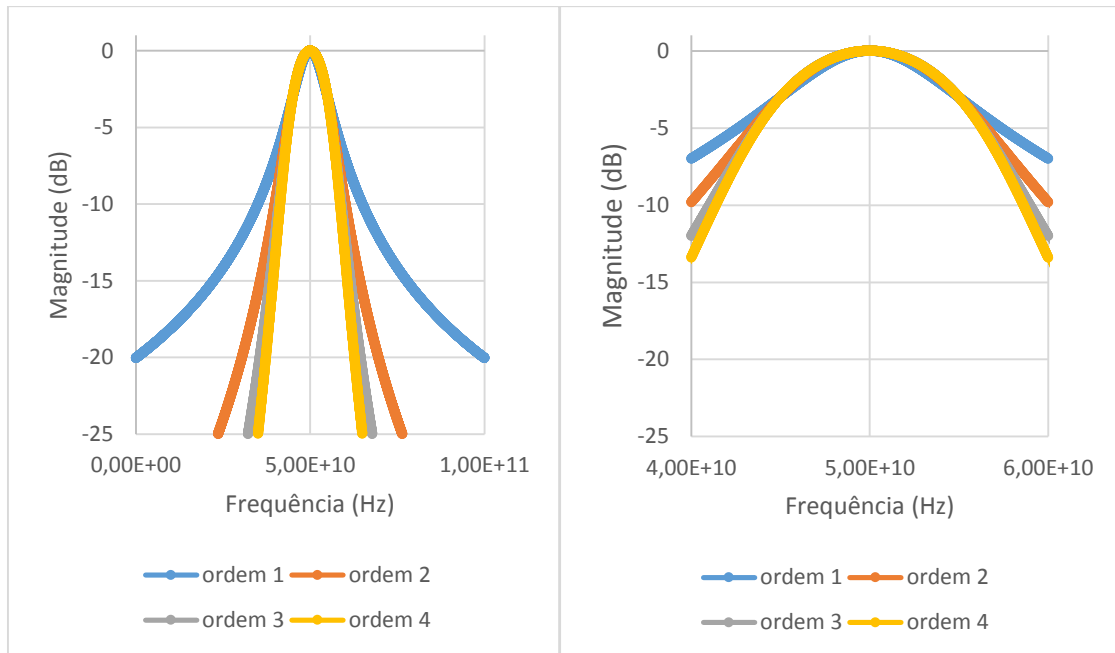


Figura 39: Magnitude do filtro (100 GHz)

Figura 40: Magnitude do filtro (20 GHz)

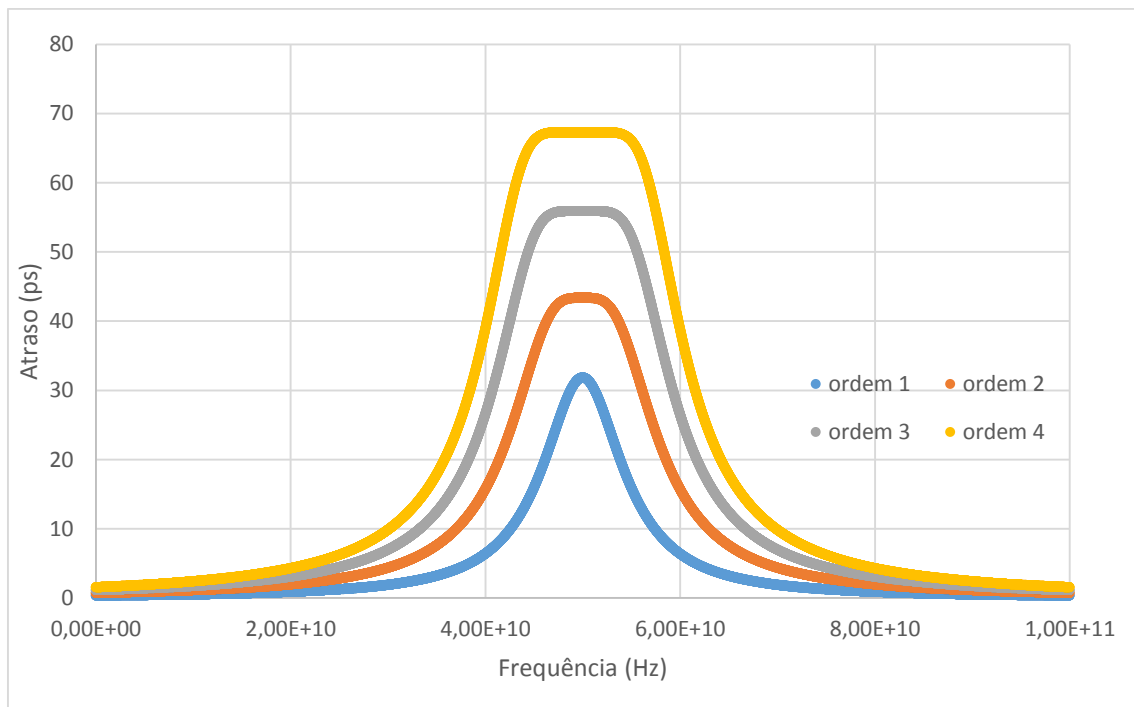


Figura 41: Atraso para várias ordens do filtro de Bessel.

A partir da Figura 38, é possível verificar que o aumento da ordem (de ordem 1 para ordem 2) melhora substancialmente o BER; no entanto verifica-se também que após a ordem 2 o BER piora bastante. Estes resultados poderiam ser contrariados pela análise dos gráficos de magnitude do filtro: à medida que se aumenta a ordem, a resposta do filtro apresenta maior rejeição fora da banda, diminuindo dessa forma a diafonia inter canal, e supostamente esta característica devia melhorar o BER, no entanto isso não se verifica. Esta degradação do BER, é resultado da variação do atraso

de fase à medida que se aumenta a ordem do filtro. Pode-se verificar, na Figura 41, que o aumento da ordem aumenta a variação do atraso e daí o aumento do BER.

Para a ordem 2 conseguem-se os melhores resultados do BER, e portanto será esta a ordem escolhida para os próximos testes.

O teste seguinte foi verificar como a introdução de fibra iria afetar o sistema. Para tal correu-se um *sweep* à distância de fibra a aplicar no sistema e representou-se o BER em função da distância.

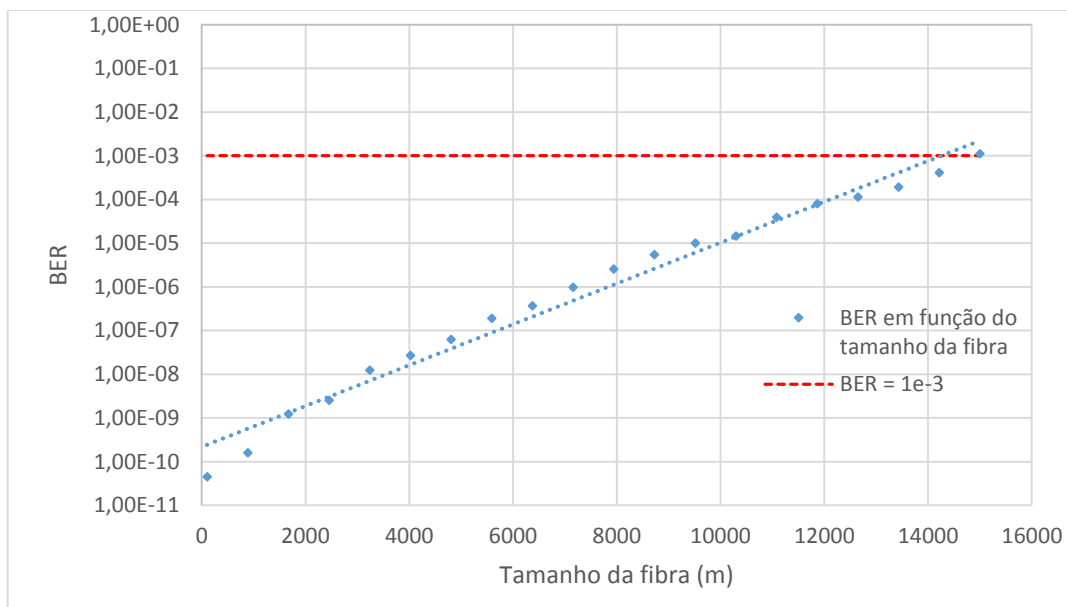


Figura 42: BER em função do comprimento de fibra (m)

Da Figura 42 pode-se verificar que o tamanho máximo de fibra a introduzir no sistema, de modo a que o BER seja menor que 10^{-3} , é 14.5 km. Seguidamente é importante utilizar esta informação do máximo comprimento e voltar a fazer a dessintonia do filtro. Tal experiência é apresentada na Figura 43.

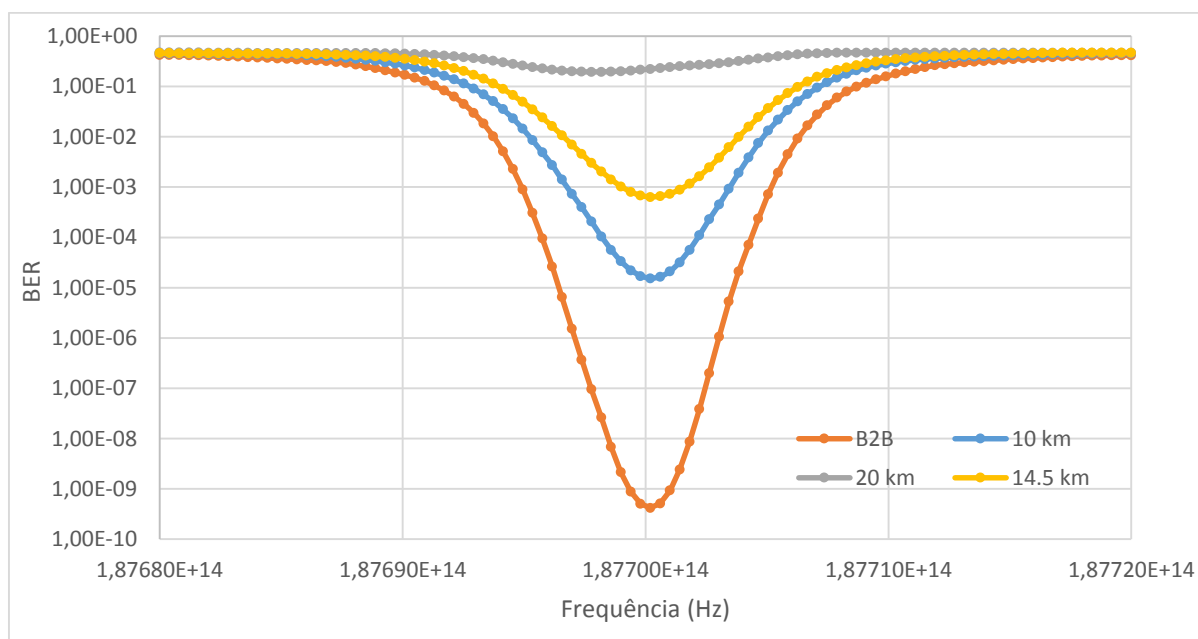


Figura 43: Dessintonia num filtro de Bessel, para vários comprimentos de fibra.

A introdução de fibra no sistema, Figura 43, traz uma grande degradação do sistema, de tal forma, que para se ter um BER máximo de 10^{-3} só se poderão colocar no máximo 14,5 km de fibra. Como a intenção deste estudo seria verificar até onde se poderiam relaxar os parâmetros dos filtros e mesmo assim obter BERs inferiores a 10^{-3} , então apresentam-se a seguir os valores para o máximo desvio da frequência central que o filtro poderá sofrer.

Tabela 6: Máximo desvio da frequência central, para vários comprimentos de fibra.

Comprimento da Fibra (km)	Máximo desvio da frequência central (GHz)
0 (B2B)	5
10	3,2
14,5	1,25

4.5.2. Filtro *Butterworth*

Para este tipo de filtro realizaram-se as mesmas experiências que para o filtro de *Bessel*. Na Figura 44 apresenta-se o gráfico do BER em função do desvio de frequência central do filtro; também se apresenta a magnitude deste filtro, na Figura 45 e Figura 46, assim como o atraso de fase, na Figura 47.

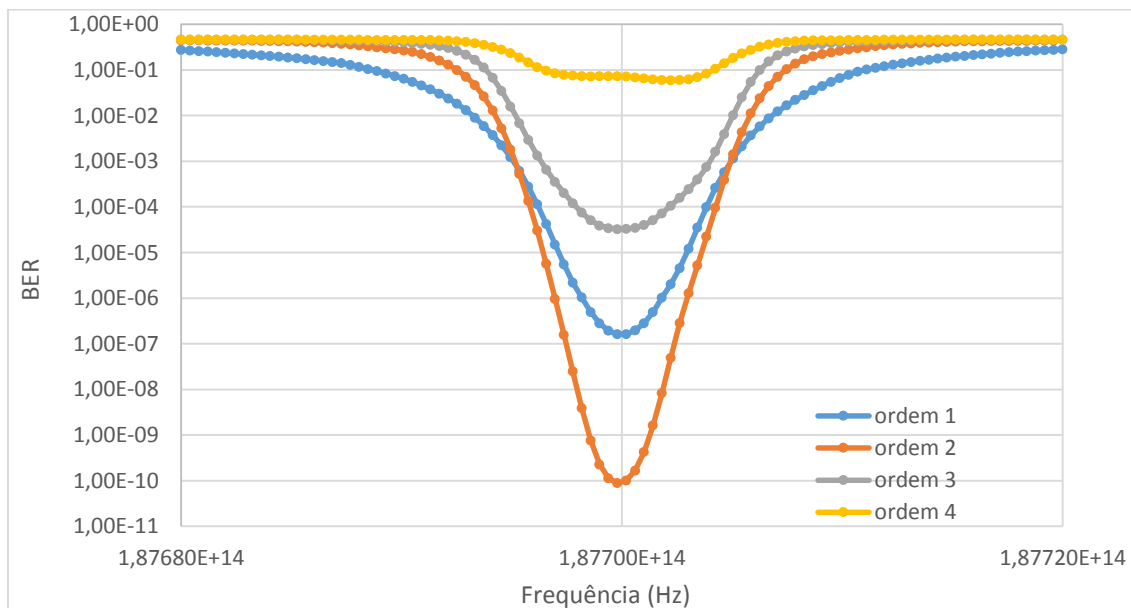


Figura 44: BER em função do desvio de frequência para várias ordens de um filtro *Butterworth*.

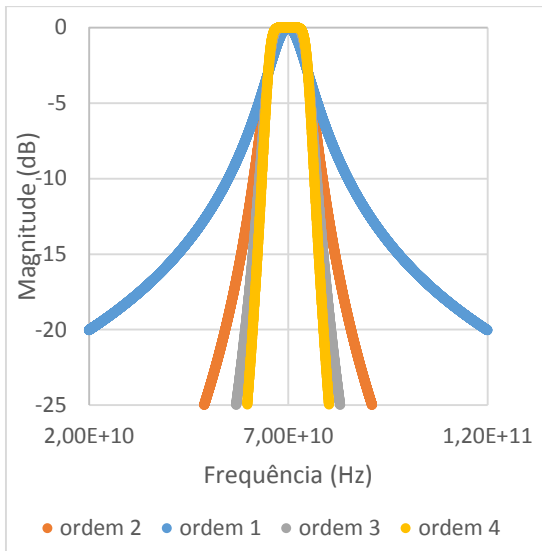


Figura 45: Magnitude do filtro (100 GHz)

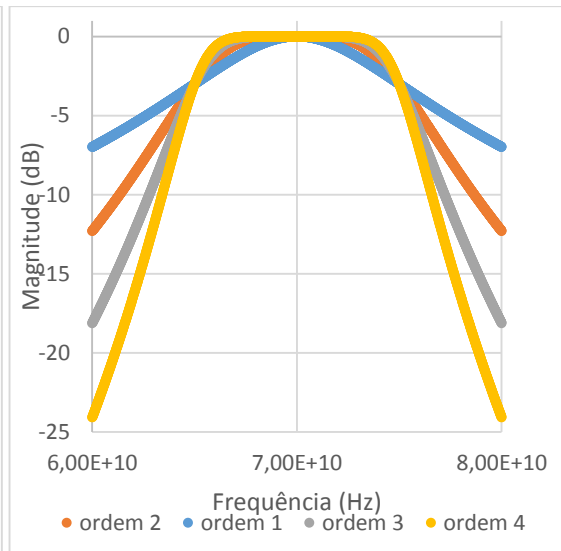


Figura 46: Magnitude do filtro (20 GHz)

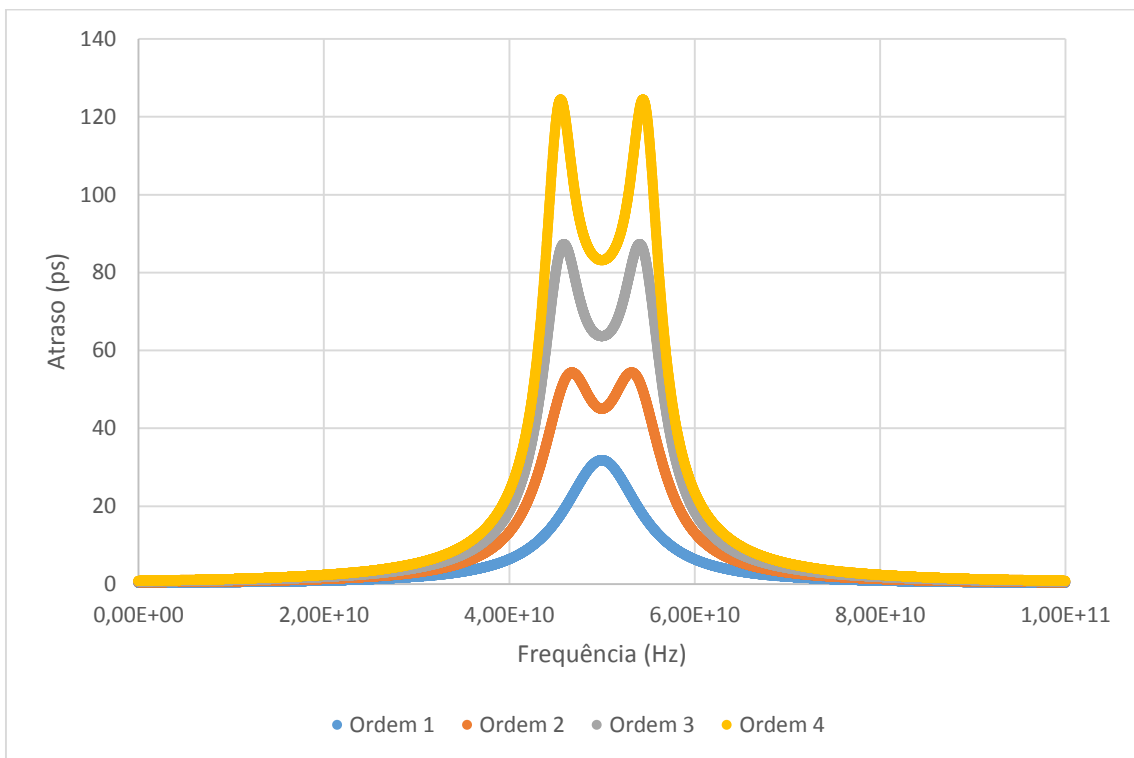


Figura 47: Atraso para as várias ordens do filtro Butterworth.

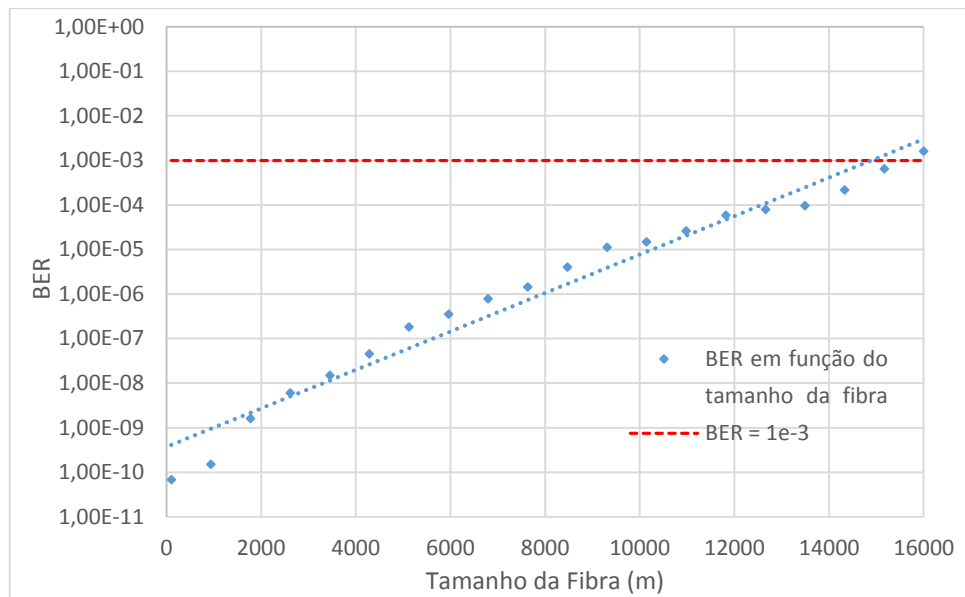


Figura 48: BER em função do tamanho da fibra.

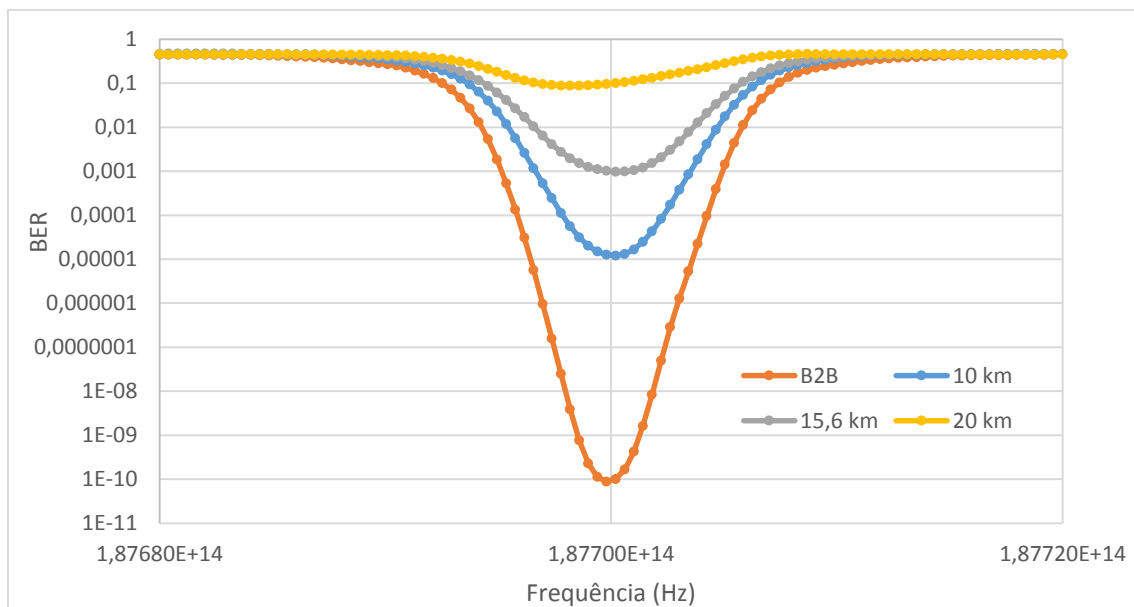


Figura 49: Dessintonia num filtro butterworth, para vários comprimentos de fibra.

Tabela 7: Máximo desvio da frequência central, para vários comprimentos de fibra.

Comprimento da Fibra (km)	Máximo desvio da frequência central (GHz)
0 (B2B)	4,85
10	3,5
15,6	0,5

Começando a análise deste filtro, verifica-se de imediato que o seu comportamento é bastante semelhante ao filtro de *Bessel*. Na Figura 44 verifica-se que a ordem 2 é a que apresenta melhores resultados em termos de BER, quando se faz a *dessintonia* deste filtro. A explicação para este resultado é a mesma que para o filtro de *Bessel*, uma vez que se verifica que haverá um balanço entre o *atraso* na banda passante e a rejeição fora da banda do filtro.

Ao introduzir a fibra no sistema verifica-se uma degradação do BER, como seria de esperar. De acordo com a Figura 48 o máximo comprimento de fibra a utilizar, sem que o BER seja superior a 10^{-3} , é 15.6 km. Como seria expectável também se verifica que à medida que se aumenta o tamanho da fibra, também o desvio central de frequência máximo que o filtro pode sofrer irá diminuir.

4.5.3. Filtro *Chebyshev*

Nesta secção ir-se-á apresentar o mesmo sistema, mas recorrendo a um filtro de *Chebyshev*. Na Figura 50 é apresentado o gráfico do BER em função do desvio de frequência; também se apresenta a magnitude deste filtro, na Figura 51 e Figura 52, assim como o atraso de fase, na Figura 53.

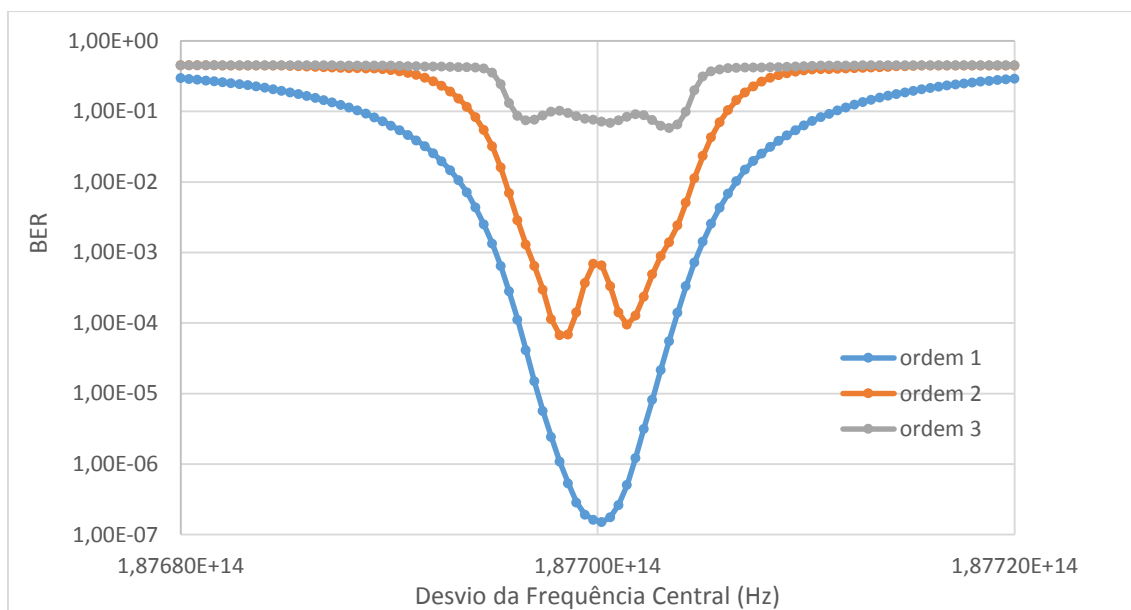


Figura 50: BER em função do desvio de frequência central, para várias ordens de um filtro de Chebyshev.

Ao contrário do que se verificou nos casos anteriores, a ordem 1 é aquela que apresenta melhores valores em termos de BER, sendo que a ordem 3 até já ultrapassa o valor de BER que se considera aceitável (10^{-3}).

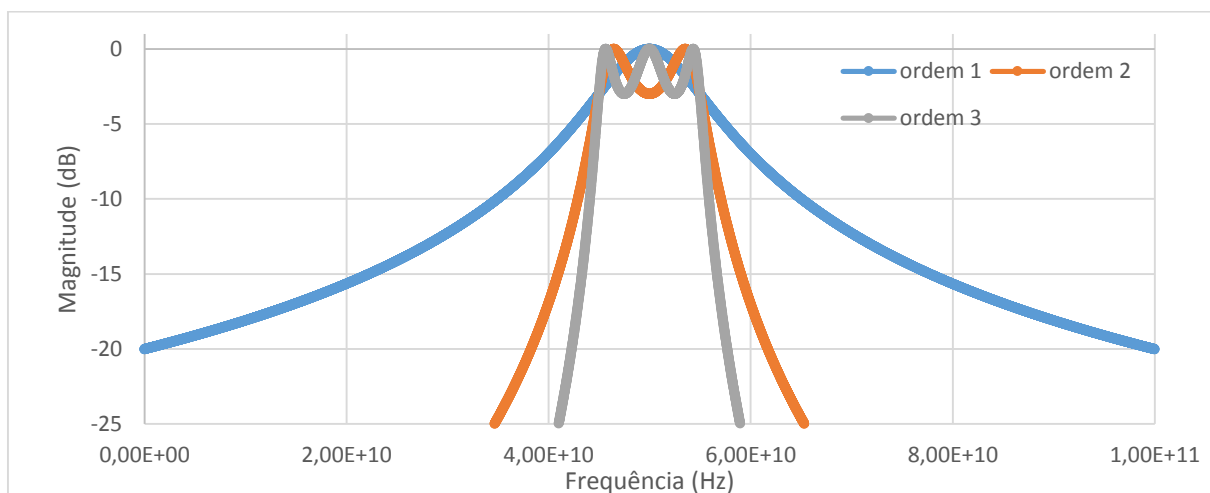


Figura 51: Magnitude do filtro Chebyshev (100 GHz).

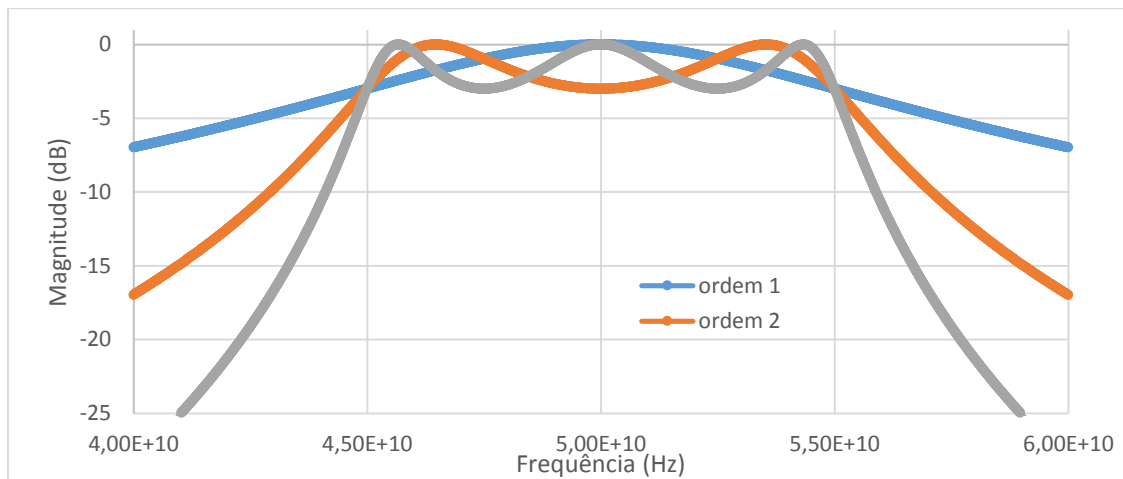


Figura 52: Magnitude do filtro Chebyshev (20 GHz).

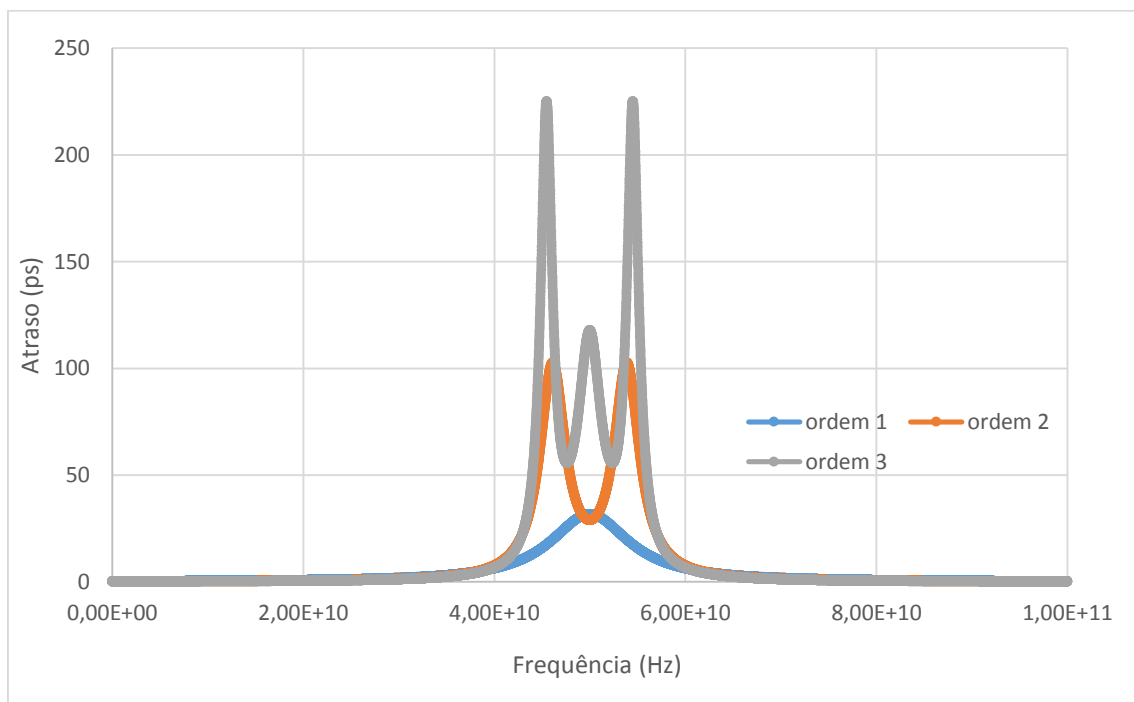


Figura 53: Atraso para as várias ordens do filtro Chebyshev.

Observando agora os gráficos relativos à magnitude (Figura 51 e Figura 52) verifica-se que o aumento da ordem irá provocar uma oscilação na zona de passa-banda do filtro. Quanto ao gráfico relativo ao atraso (Figura 53), verifica-se que o aumento da ordem aumenta bastante o atraso. Tendo em conta estas duas verificações, pode-se concluir que os dados da Figura 50 fazem todo o sentido, uma vez que à medida que se aumenta a ordem do filtro ir-se-á verificar que o BER tende a piorar.

De seguida introduziu-se fibra no sistema, como se pode verificar pela Figura 54.

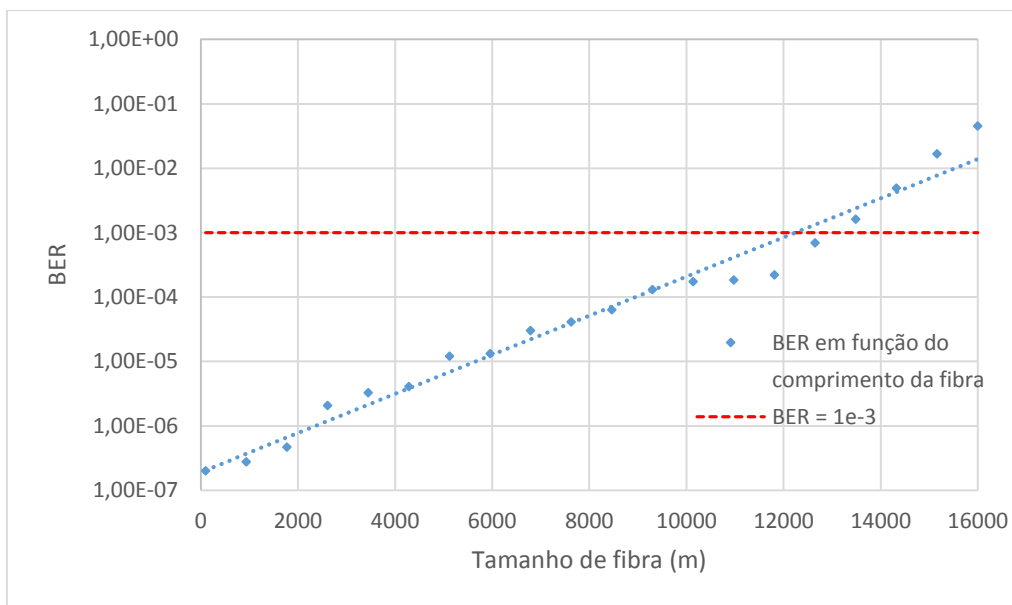


Figura 54: BER em função do comprimento da fibra.

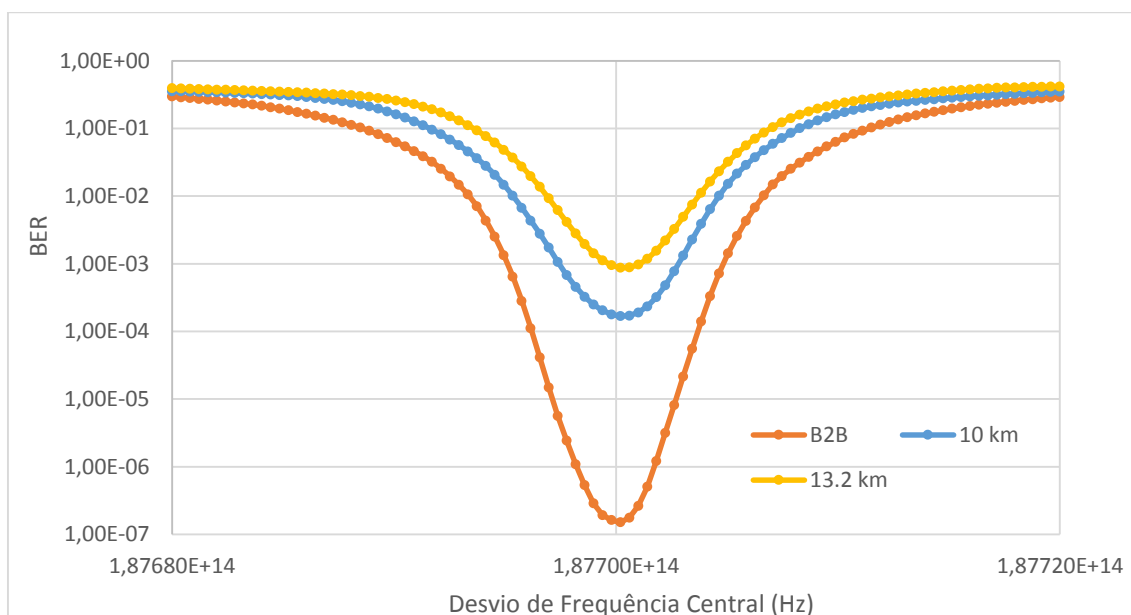


Figura 55: BER em função do desvio da frequência central para vários comprimentos de fibra (num filtro Chebyshev).

Tabela 8: Máximo desvio da frequência central, para vários comprimentos de fibra.

Comprimento da Fibra (km)	Máximo desvio da frequência central (GHz)
0 (B2B)	4,6
10	2,7
13,2	0,75

Como já seria de esperar, a introdução de fibra vem trazer um agravamento do BER. De acordo com a Figura 54, o máximo comprimento de fibra a utilizar será 13,2 km, de modo a que o BER não seja superior a 10^{-3} . À medida que se aumenta o comprimento da fibra, também a dessintonia máxima que o filtro poderá sofrer vai diminuindo.

4.5.4. Comparação dos tipos de filtro

Em termos do comprimento máximo de fibra que se pode colocar no sistema, as diferenças entre os vários filtros não são de extrema relevância sendo que a diferença entre o que tem maior comprimento e o que tem menor é de 2 km.

Quanto ao máximo desvio da frequência central, a 10 km do emissor, o que tem o melhor valor é o *Butterworth* (o de *Bessel* também é muito próximo) e o de pior valor é o *Chebyshev*.

5. Conclusões e trabalho futuro

5.1. Conclusões

Devido ao rápido crescimento da oferta de serviços de telecomunicações e à contínua busca por maiores larguras de banda por parte dos utilizadores, as atuais tecnologias estão sujeitas a se tornarem obsoletas muito rapidamente. Por este motivo, é necessário continuar com o estudo de novas redes que venham assegurar que o crescimento é assegurado. No âmbito destas novas redes vem o estudo apresentado neste trabalho para o filtro de seleção de canal em NG-PON2.

Por outro lado, procura-se também implementar novas soluções de transmissão de sinais de rádio frequência de forma mais eficiente, o que leva ao maior tema de estudo neste trabalho: a transmissão de rádio sobre fibra (analógica e digital).

Primeiramente foi apresentada uma introdução teórica dos componentes óticos referidos nesta dissertação, assim como uma breve descrição das fontes de degradação predominantes em cada componente. Seguidamente apresentou-se uma descrição dos sistemas de transmissão de rádio sobre fibra, assim como uma descrição de NG-PON2.

Seguidamente, no capítulo 3, foram apresentadas e estudadas as tecnologias de transmissão de rádio sobre fibra, assim como o estudo do filtro de seleção de canal em NG-PON2.

Como se verificou no capítulo 3, a transmissão de rádio digitalizado apresenta algumas vantagens quando comparada com a transmissão analógica de rádio sobre fibra. Apesar de o processo de digitalização encarecer o sistema, verifica-se que este processo permite que se atinjam potências óticas recebidas mais baixas do que na transmissão analógica, assim como uma maior gama dinâmica de funcionamento.

Em termos de conclusões experimentais, verifica-se que na transmissão analógica, com modulação de 16-QAM e ritmo de transmissão de 1.25 Gbps, a introdução de fibra até 40 km não provoca um grande impacto no desempenho global do sistema, enquanto não se ultrapassa a barreira dos 12% imposta para o EVM, tendo-se observado que a introdução da fibra baixou a sensibilidade do sistema em apenas 1 dB. Já no caso da transmissão digital, observou-se que o sistema tem um comportamento linear em termos de EVM até uma certa potência ótica recebida, sendo que quanto maior fosse o número de bits de resolução, menor seria o valor do EVM. A introdução de fibra no sistema digital também não provocou grande influência no caso de 4 bits, já no caso de 8 bits a diferença de sensibilidade entre 0 km e 40 km foi de 1.5 dB.

Ainda no capítulo 3, são exibidos resultados obtidos por simulação para vários tipos de filtro. Nesta parte do trabalho foi observado de que forma é que a alteração da ordem combinada com a dessintonia do filtro iriam afetar o sistema em termos de BER. Depois se percebeu qual seria a melhor ordem para o filtro, introduziu-se fibra no sistema e observou-se o seu comportamento. De entre os três filtros apresentados (*Bessel*, *Butterworth* e *Chebyshev*), aquele em que pode ser aplicado o maior comprimento de fibra e o que pode sofrer um maior desvio da frequência central é o *Butterworth*, no entanto o de *Bessel* também apresenta valores muito próximos deste.

Em suma, foram apresentados nesta dissertação resultados experimentais que certamente ajudarão na compreensão de sistemas de transmissão de rádio sobre fibra, assim como resultados de simulação que irão ser úteis na caracterização experimental do filtro de seleção de canal em NG-PON2.

5.2. Trabalho Futuro

Depois dos resultados obtidos nesta dissertação, será de todo o interesse continuar o estudo destas tecnologias. Para tal, sugere-se, para trabalho futuro, os seguintes tópicos:

- Simular e testar outros ritmos de transmissão e formatos de modulação RF, em sistemas ROF e DROF.
- Analisar o possível impacto de fenómenos não lineares associados à propagação na fibra, nesses sistemas.
- Simular e testar o impacto no sistema de diferentes frequências intermédias, no DROF.
- Montagem experimental do sistema utilizado para o estudo do filtro.

6. Bibliografia

- [1] A. Nirmalatha, P. A. Gamage, C. Lim, D. Novak e R. Waterhouse, "Digitized Radio-Over-Fiber Technologies for Converged Optical Wireless Access Network," *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, VOL 28, AUGUST 15, 2010.
- [2] P. A. Gamage, A. Nirmalathas, C. Lim, D. Novak e R. Waterhouse, "Design and Analysis of Digitized RF-Over-Fiber Links," *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, JUNE 15, 2009.
- [3] ITU, "ITU Telecommunication Standardization Sector," [Online]. Available: <http://www.itu.int/en/ITU-T/Pages/default.aspx>. [Acedido em Junho 2015].
- [4] IEEE, "IEEE - The world's largest professional association for the advancement of technology," 2015. [Online]. Available: <https://www.ieee.org/index.html>. [Acedido em Junho 2015].
- [5] FSAN, "FSAN," [Online]. Available: www.fsan.org. [Acedido em Junho 2015].
- [6] M. Pospiec e S. Liu, "Laser Diodes an Introduction," University of Hannover, 2004.
- [7] R. Paschotta, "Encyclopedia of Laser Physics And Technology - Relative Intensity Noise, RIN," RP Photonics Encyclopedia, [Online]. Available: http://www.rp-photonics.com/relative_intensity_noise.html. [Acedido em Maio 2015].
- [8] VPIphotonics GmbH, *User's Manual*, 2013.
- [9] L. Turner, K. Weber, C. Hawthorn e R. Scholten, "Frequency noise characterisation of narrow linewidth diode lasers," em *Optics Communications*, Universidade de Melbourne, 2002.
- [10] D. R. Paschotta, "Encyclopedia of Laser Physics and Technology - Chirp," RP Photonics Encyclopedia, 2015. [Online]. Available: <http://www.rp-photonics.com/chirp.html?s=ak>. [Acedido em Maio 2015].
- [11] X. Fernando, *Radio over Fiber - An Optical Technique for wireless Access*, Ryerson Communications Lab, Toronto, 2009.
- [12] G. Agrawal, "Fiber-Optic Communication Systems", John Wiley & Sons Inc, 2002.
- [13] D. Todorinovic, A. Marincic e J. Iida, "Hybrid Fiber-Coax CATV systems: the reverse path laser selection and testing methodologies," *Series: Electronics and Energetics vol. 11, No.2*, p. 239, 1998.
- [14] C. Silveira, *Dissertação de Mestrado: Estudo de Formatos Especiais de Modulação Digital Para Comunicações Ópticas*, São Paulo, 2009.

- [15] R. Ramaswani, K. N. Sivarajan e G. H. Sasaki, *Optical Networks: A Practical Perspective*, 2010.
- [16] M. d. Comunicações, ““Optical Fibres”,” 2014. [Online]. Available: http://macao.communications.museum/eng/exhibition/secondfloor/moreinfo/2_8_3_OpticalFibres.html. [Acedido em Maio 2015].
- [17] M. Wilder e A. Company, “Understanding and measuring chromatic dispersion,” Julho 2000. [Online]. Available: <http://www.fiberopticonline.com/doc/understanding-and-measuring-chromatic-dispers-0002>. [Acedido em Junho 2015].
- [18] E. Raimundo-Neto, M. Santos, A. C. S. Jr. e J. A. J. Ribeiro, “Techniques for Mitigating Power Fading in mm-wave Radio Over Fiber Systems”.
- [19] J. White, “Stimulated Raman Scattering,” em *Tunable Lasers*, 2014.
- [20] ““P-I-N Photodiode | Avalanche Photo Diode”,” Electrical4U, [Online]. Available: <http://electrical4u.com/p-i-n-photodiode-avalanche-photo-diode/>. [Acedido em Abril 2015].
- [21] Y. Yang, *Tese de Doutorado: Investigation on Digitized RF Transport*, Australia, 2011.
- [22] A. Ng’oma, *Tese de Doutorado: Radio-over-Fibre Technology*, 2003, pp. 20 -23.
- [23] J. Beas, G. Castañón, I. Aldaya, A. Aragón-Zavala e G. Campuzano, “Millimeter-Wave Frequency Radio over Fiber Systems: A Survey,” *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, vol. 15, 2013.
- [24] D. Zibar, X. Yu, C. Peucheret, P. Jeppesen e I. T. Monroy, “Digital Coherent Receiver for Phase-Modulated Radio-Over-Fiber Optical Links,” *IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS*, vol. 21, 2009.
- [25] C. Lim, A. Nirmalathas e Y. Yang, *Digitized RF-over-Fiber Transport for Hybrid Fiber-Wireless Links*, The University of Melbourne.
- [26] S. Kuwano, Y. Suzuki, Y. Yamada e K. Watanabe, “Digitized Radio-over-Fiber (DROF) System for Wide-Area Ubiquitous Wireless Network,” Kanagawa, Japan, 2006.
- [27] PT Inovação e Sistemas, “Evolution of FTTH Networks for NG-PON2,” Aveiro, 2014.
- [28] Y. Luo, X. Zhou, F. Effenberger, X. Yan, G. Peng, Y. Qian e Y. Ma, “Time- and Wavelength-Division Multiplexed Passive Optical Network (TWDM-PON) for Next-Generation PON Stage 2 (NG-PON2),” *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, VOL. 31, NO. 4, 2013.
- [29] Wuhan Telecommunication Devices Co., “BOSA FOR GEPON OLT”.
- [30] C. Zhao e R. J. Baxley, “Error Vector Magnitude Analysis for OFDM Systems,” em *Signals, Systems and Computers*, Califórnia.

- [31] ETSI - European Telecommunications Standards Institute, "LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception.," 2010.
- [32] Excelitas Technologies, *Avalanche photodiode - A User Guide*.
- [33] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, *Draft new Recommendation ITU-T G.989.2*, 2015.
- [34] S. M. J. Alam, M. R. Alam, G. Hu e M. Z. Mehrab, "Bit Error Rate Optimization in Fiber Optic Communications," *International Journal of Machine Learning and Computing*, Vol. 1, No. 5, 2011.
- [35] J. S. III, *Introduction to Digital Filters with Audio Applications*, Stanford University: W3K Publishing, 2007.
- [36] C. DeCusatis, *Handbook of Fiber Optic Data Communication*, California: Elsevier Inc., 2008.
- [37] B. J. Puttnam, J.-M. D. Mendinueta, J. Sakaguchi, R. S.Luis, W. Klaus, Y. Awaji, N. Wada, A. Kanno e T. Kawanishi, "105Tb/s Transmission System Using Low-cost, MHz Linewidth DFB Lasers Enabled by Self-Homodyne Coherent Detection and a 19-Core Fiber," *OFC/NFOEC Technical Digest*, 2013.